

Оригинальная статья

УДК 621.791:624

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-57-63

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ОКСИДОВ ТИТАНОМ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ**

© 2023 г. Р. Е. Крюков¹, Ю. В. Бендре¹, Н. А. Козырев², А. А. Сычев¹, А. В. Жуков¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)

Аннотация. Показано, что широкое распространение для наплавки сталей, обладающих высокой износостойкостью, получили порошковые проволоки с титаном. Определена необходимость учета термодинамического фактора, позволяющего оценить химическое сродство между веществами, входящими в состав сварочных (наплавочных) материалов и наиболее вероятные пути химических превращений при учете всех возможных реакций и состояний реагентов. Рассмотрена возможность формирования ряда оксидных неметаллических включений нехарактерных для температур электросталеплавиных процессов. Проведена оценка термодинамических свойств $[\Delta_f H^\circ(T), \Delta_f G^\circ(T)]$ восстановительных реакций оксидов FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO с титаном (45 реакций) в системах оксид металла – титан в стандартных условиях с образованием соединений TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂. Термодинамические характеристики реакций рассчитывали в интервале температур 1500 – 3000 К по термодинамическим свойствам $[H^\circ(T) - H^\circ(298,15 \text{ K})]$, $S^\circ(T)$, $\Delta_f H^\circ(298,15 \text{ K})$ реагентов Ti, TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂, Fe, FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Al, Al₂O₃, Mn, MnO, Si, SiO₂, Cr, Cr₂O₃, Ca, CaO, Mg, MgO. Показано, что наибольшей вероятностью протекания и, соответственно, наибольшим выделением теплоты отличаются реакции титана с оксидами кальция и железа, наименьшая вероятность протекания и, соответственно, выделения теплоты наблюдается при восстановлении оксида кремния и алюминия. Реакции с оксидами марганца и хрома занимают промежуточное место. Реакция восстановления оксида магния титаном с образованием TiO становится термодинамически вероятной при температурах выше 2600 К. Расчет термодинамических свойств реакций показал, что использование титана в качестве восстановителя при электродуговой наплавке порошковой проволокой вполне приемлемо.

Ключевые слова: титан, электродуговая наплавка, порошковая проволока, термодинамические свойства

Для цитирования: Крюков Р.Е., Бендре Ю.В., Козырев Н.А., Сычев А.А., Жуков А.В. Термодинамические аспекты возможности восстановления оксидов титаном при электродуговой наплавке. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(4(46)):57–63. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-57-63](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-57-63)

Original article

**THERMODYNAMIC ASPECTS OF THE POSSIBILITY OF TITANIUM OXIDE
REDUCTION DURING ELECTRIC ARC SURFACING**

© 2023 R. E. Kryukov¹, Y. V. Bendre¹, N. A. Kozyrev², A. A. Sychev¹, A. V. Zhukov¹

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow, 105005, Russian Federation)

Abstract. It is shown that titanium-coated powder wires are widely used for surfacing steels with high wear resistance. It is determined that in the calculations it is necessary to take into account the thermodynamic factor, which makes it possible to assess the chemical affinity between the substances that make up the welding (surfacing) materials and the most likely ways of chemical transformations, taking into account all possible reactions and states of the reagents. It is indicated that it is necessary to consider the possibility of forming a number of oxide non-metallic inclusions that are not characteristic for temperatures of electric steelmaking processes. A comparative assessment of the thermodynamic properties ($\Delta_r H^\circ(T)$, $\Delta_r G^\circ(T)$) of reactions with titanium in the metal oxide – titanium system under standard conditions is given. The thermodynamic properties of [$\Delta_r H^\circ(T)$, $\Delta_r G^\circ(T)$] reduction reactions of FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO oxides with titanium (45 reactions) in metal oxide – titanium systems under standard conditions with the formation of TiO oxides were evaluated, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂. It is shown that the reactions of titanium with calcium and iron oxides are most likely to occur and, accordingly, the greatest heat release, while the least probability of occurrence and, accordingly, heat release is observed during the reduction of silicon and aluminum oxide. Reactions with manganese and chromium oxides occupy an intermediate place. The reduction reaction of magnesium oxide with titanium is not possible without an additional source of heat. The calculation of the thermodynamic properties of the reactions showed that the use of titanium as a solvent for electric arc welding with a powder wire is quite acceptable.

Keywords: powder wire, electric arc surfacing, thermodynamics, titanium oxide reduction

For citation: Kryukov R.E., Bendre Yu.V., Kozyrev N.A., Sychev A.A., Zhukov A.V. Thermodynamic aspects of the possibility of titanium oxide reduction during electric arc surfacing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(4(46)):57–63. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-57-63](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-57-63)

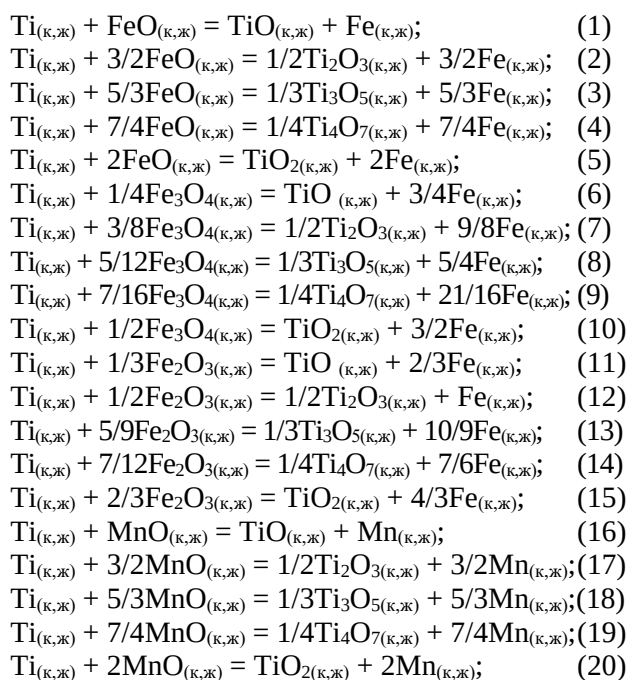
Введение

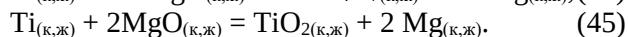
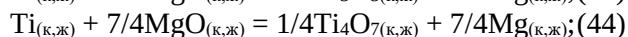
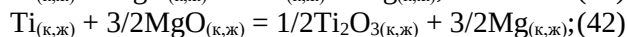
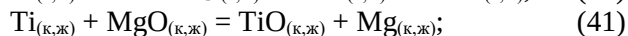
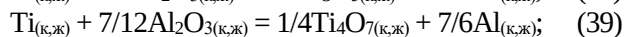
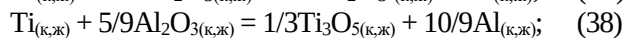
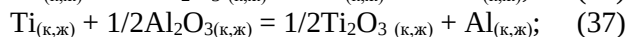
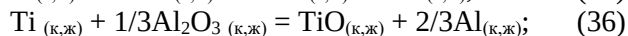
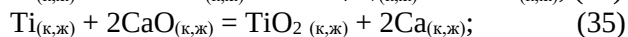
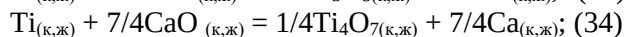
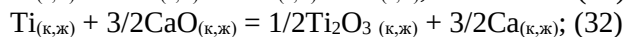
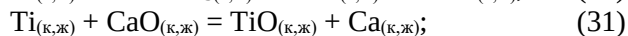
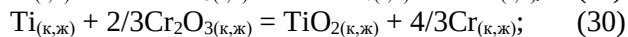
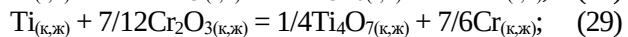
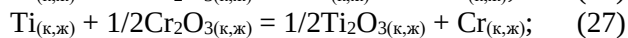
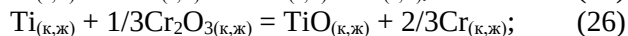
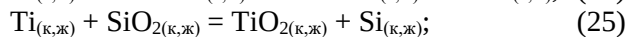
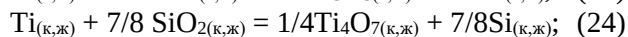
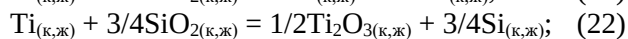
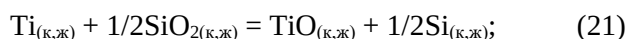
В настоящее время разработке и исследованию новых материалов для восстановления деталей машин горно-металлургического комплекса методом электродуговой наплавки порошковой проволокой уделяется большое внимание как в Российской Федерации, так и за рубежом [1 – 9]. Широкое распространение для наплавки сталей, обладающих высокой износостойкостью, получили порошковые проволоки с титаном. Центральной проблемой использования наплавки является перенос электродного материала на рабочую поверхность изделия, в частности процессы образования и отрыва капли. При этом капля формируется до отрыва от электрода за короткий отрезок времени (примерно 120 мс) и температура на ее поверхности может достигать 2950 – 3000 К, что значительно больше, чем температура металла при плавке стали в электросталеплавильной дуговой печи (примерно 2000 К) [10 – 20]. При этом необходимо учесть, что температура в столбе дуги может достигать 10000 – 12000 К и некоторые компоненты электрода, испаряясь, находятся короткое время в приэлектродном пространстве и стволе дуги при температурах более 3000 К, находясь в атомарном, молекулярном и ионизированном состояниях (дуга может гореть устойчиво даже в вакууме) [21 – 23].

При наплавке стали металлургический процесс протекает при более высоких температурах, чем в электросталеплавильных печах, что в итоге приводит к необходимости изучения протекающих реакций в более высоком температурном

интервале. Кроме того, необходимо учесть термодинамический фактор, позволяющий оценить химическое сродство между веществами, входящими в состав сварочных (наплавочных) материалов и наиболее вероятные пути химических превращений при учете всех возможных реакций и состояний реагентов. При этом необходимо рассмотреть возможность формирования ряда оксидных неметаллических включений, не характерных для температур электросталеплавильных процессов.

Рассмотрены следующие возможные реакции восстановления титаном:





Все реакции записаны на 1 моль титана. Термодинамические характеристики реакций (1) – (45) при стандартных условиях $[\Delta_r H^\circ(T), \Delta_r S^\circ(T), \Delta_r G^\circ(T)]$ рассчитывали известными методами [24] в интервале температур 1500 – 3000 К по термодинамическим свойствам $[[H^\circ(T) - H^\circ(298,15 \text{ K})], S^\circ(T), \Delta_f H^\circ(298,15 \text{ K})]$ реагентов Ti, TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂, Fe, FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Al, Al₂O₃, Mn, MnO, Si, SiO₂, Cr, Cr₂O₃, Ca, CaO, Mg, MgO [25, 26]. В качестве стандартных состояний для веществ-реагентов в интервале температур 1500 – 3000 К были использованы Ti_(к,ж), TiO_(к,ж), Ti₂O_{3(к,ж)}, Ti₃O_{5(к,ж)}, Ti₄O_{7(к,ж)}, TiO_{2(к,ж)}, Al_(к,ж), Al₂O_{3(к,ж)}, Fe_(к,ж), FeO_(к,ж), Fe₂O_{3(к,ж)}, Fe₃O_{4(к,ж)}, Mn_(к,ж), MnO_(к,ж), Si_(к,ж), SiO_{2(к,ж)}, Cr_(к,ж), Cr₂O_{3(к,ж)}, Ca_(к,ж), CaO_(к,ж), Mg_(к,ж), MgO_(к,ж). Рассчитанные стандартные энергии Гиббса и энтальпии для рассматриваемых реакций (1) – (45) в зависимости от температуры приведены на рисунке.

Расчет стандартной энергии Гиббса и энтальпии реакций (1) – (45) показал, что для каждого из девяти восстанавливаемых титаном оксидов (FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO) в реакциях на 1 моль титана изменяется термодинамическая вероятность получения того или иного оксида титана в качестве наиболее вероятного продукта.

Для оксида FeO наименее вероятно образование оксида TiO, наиболее вероятно образование высшего оксида TiO₂ до температуры 2100 К и Ti₄O₇ при температуре более 2100 К.

Для оксида Fe₃O₄ наименее вероятно образование TiO, наиболее вероятно получение высшего оксида TiO₂ до температуры 2130 К и Ti₄O₇ после температуры 2130 К.

Для оксида Fe₂O₃ наименее вероятно образование TiO, наиболее вероятно получение высшего оксида TiO₂ до температуры 2600 К и Ti₄O₇ после рассматриваемой температуры.

Для оксида MnO наименее вероятно образование TiO₂, наиболее вероятно получение оксида Ti₂O₃ до температуры 2120 К и после этой температуры – соединение Ti₃O₅.

Для оксида SiO₂ наименее вероятно образование TiO₂, наиболее вероятно получение оксида TiO до температуры 2600 К и после этой температуры Ti₃O₅.

Для оксида Cr₂O₃ наименее вероятно образование TiO, наиболее вероятно получение оксида Ti₃O₅.

Для оксида Al₂O₃ наименее вероятно образование высшего оксида TiO₂, наиболее вероятно получение оксида TiO.

Для оксида CaO наименее вероятно образование TiO, наиболее вероятно получение оксида TiO₂.

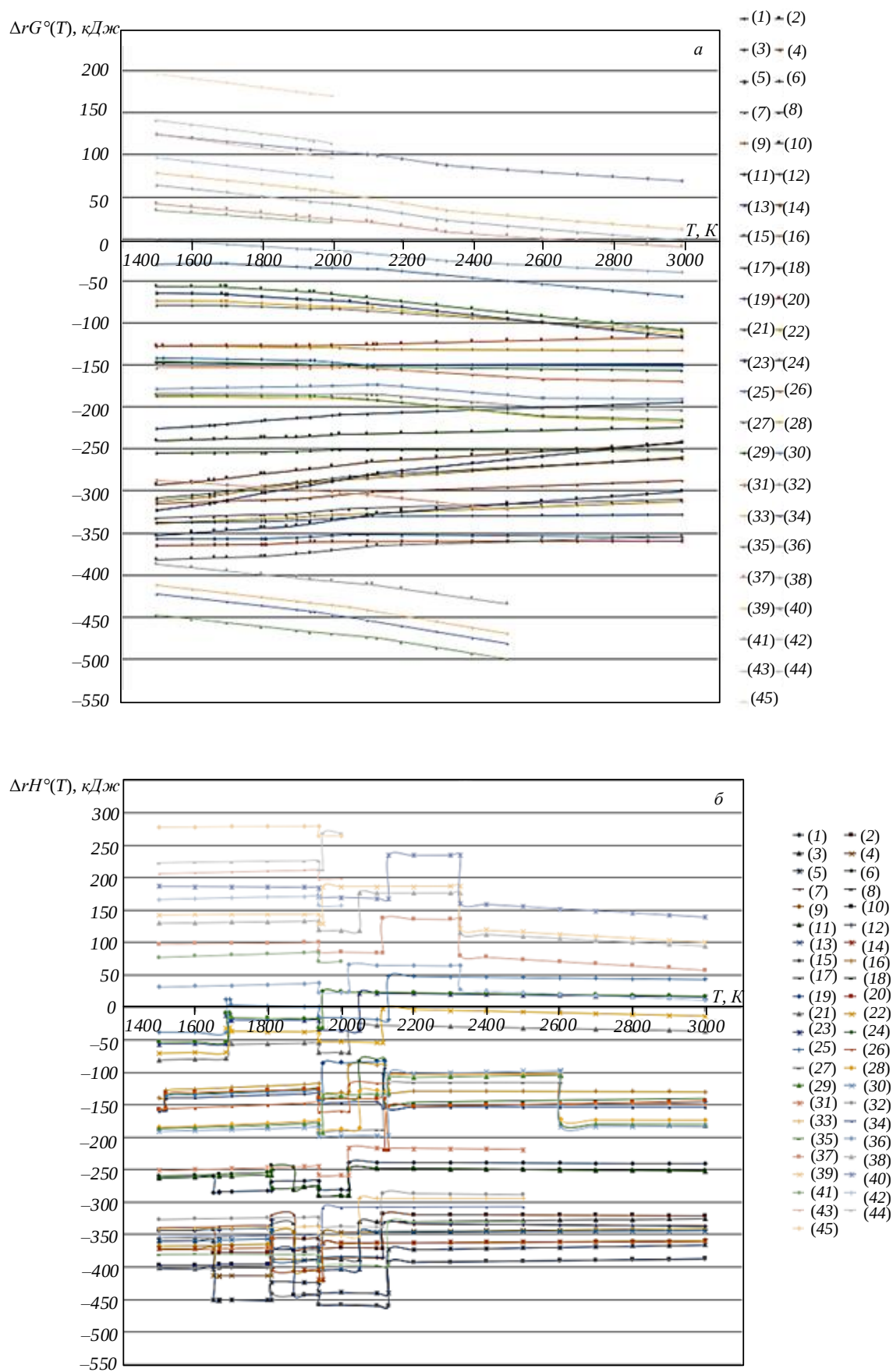
Для оксида MgO наименее вероятно образование TiO₂, наиболее вероятно получение оксида TiO.

Наибольшей вероятностью протекания и, соответственно, наибольшим выделением теплоты отличаются реакции титана с оксидами кальция и железа. Наименьшая вероятность протекания и, соответственно, выделения теплоты наблюдается при восстановлении оксида кремния и алюминия. Реакции с оксидами марганца и хрома занимают промежуточное место. Реакция восстановления оксида магния титаном с образованием TiO становится термодинамически вероятной при температурах выше 2600 К.

Выводы

Проведена оценка термодинамических свойств $[\Delta_r H^\circ(T), \Delta_r G^\circ(T)]$ восстановительных реакций оксидов FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO с титаном (45 реакций) в системах оксид металла – титан при стандартных условиях с образованием оксидов TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂.

Показано, что наибольшей вероятностью протекания и, соответственно, наибольшим выделением теплоты отличаются реакции титана с



Стандартные энергии Гиббса (а) и энтальпии (б) реакций (1) – (45) в зависимости от температуры
Standard Gibbs energies of reactions (a) and reactions (b) (1) – (45) depending on temperature

оксидами кальция и железа, наименьшая вероятность протекания и, соответственно, выделения теплоты наблюдается при восстановлении оксидов кремния и алюминия. Реакции с оксидами марганца и хрома занимают промежуточное место. Реакция восстановления оксида магния титаном с образованием соединения TiO становится термодинамически вероятной при температурах выше 2600 К.

Расчет термодинамических свойств реакций показал, что использование титана в качестве восстановителя при электродуговой наплавке порошковой проволокой вполне приемлемо.

Определена термодинамическая вероятность образования оксидов титана TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂, образующихся при взаимодействии титана и соединений FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zahmatkesh B., Enayati M.H. A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527:6734–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.024>
2. Morisada Y, Fujii H, Mizuno T, Abe G, Nagaoka T, Fukusumi M. Modification of thermally sprayed cemented carbide layer by friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*. 2010;204:2459–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.021>
3. Klimpel A., Lisiecki D., Janicki D., Dobrzański L.A. The study of properties of Ni-WC wires surfaced deposits. In: *Proceedings of 13th international scientific conference on achievements on mechanical and material engineering*. 16-19 may 2005:299–302.
4. Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi Gol, Gentry Wood / welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014;16(1):4–25. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
5. Badisch E., Kirchgabner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide. *Surface and Coatings Technology*. 2008;202:6016–6022.
6. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrase deposits against abrasion. *Welding International*. 2009;23:706–716. <https://doi.org/10.1080/09507110902843248>
7. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164–165:1056–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.242>
8. Kirchgabner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*. 2008;265:772–779. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
9. Chang C.M., Chen Y.C., Wu W. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy. *Tribology International*. 2010;43:929–934. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.045>
10. Buchanan V.E. Solidification and microstructural characterization of iron–chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203:3638–3646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.051>
11. Buchanan V.E., Shipway P.H., McCartney D.G. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*. 2007;263:99–110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.053>
12. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Welding Journal*. 2010;89:133–9.
13. Azimi G., Shamanian M. Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;505:598–603. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.06.084>
14. Mendez P. Modern technologies for the deposition of wear-resistant overlays. In: *Weld overlay for wear protection*. Edmonton: Canadian Welding Association; 2013.
15. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E. Studying the Influence of Tungsten and Chromium Additives in Flux Cored Wire System Fe–C–Si–Mn–Mo–Ni–V–Co on Surfaced Metal Properties. *Materials Science Forum*. 2017; 906:107–113.
16. Kozyrev N.A., Galevsky G.V., Kryukov R.E., Titov D.A., Shurupov V. M. New materials for welding and surfacing. *Iop Conference Series: Materials Science And Engineering*. 2016;150:012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012031>
17. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Osetkovsky I.V. Study of the properties of flux cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co system for the strengthening of nodes and parts of equipment used in the mineral mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;84:012018. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012018>
18. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. *Тугоплавкие соединения*. Москва: Металлургия, 1976:560.
19. Пацекин В.П., Рахимов К.З. *Производство порошковой проволоки*. Москва: Металлургия, 1979:80.
20. Патон Б.Е. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва: Металлургия, 1974:768.

21. Choi, J.H., Lee J., Yoo C.D. Dynamic force balance model fore metal transfer analysis in arcwelding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001;34:2658–2664. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/34/17/313>
 22. Lu F., Wang H.P., Murphy A.B., Carlson B.E. Analysis of energy flow in gas metal arc welding processes through self-consistent three-dimensional process simulation. Carlson. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;68:215–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.021>
 23. Tashiro S., Zeniya T., Murphy A.B., Tanaka M. Visualization of fume formation process in arc welding with numerical simulation. *Surface & Coatings Technology*. 2013;228:301–305.
 24. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0 [Электронный ресурс]: data compiled and evaluated by M.W. Chase, C.A. Davies, J.R. Dawney, Jr., D.J. Frurip, R.A. Donald, A.N. Syvernd. URL: <http://kinetics.nist.gov/janaf>. (accessed: 20.10.2023).
 25. Глушко В.П., Гурвич Л.В. и др. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. Т. 1. Кн. 1. Москва: Наука, 1978:22.
 26. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. 5, 6 / Под ред. В.С. Иориша. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/tsiv/>. (дата обращения: 20.10.2023).
- ### REFERENCES
1. Zahmatkesh B., Enayati M.H. A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527:6734–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.024>
 2. Morisada Y, Fujii H, Mizuno T, Abe G, Nagaoka T, Fukusumi M. Modification of thermally sprayed cemented carbide layer by friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*. 2010;204:2459–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.021>
 3. Klimpel A., Lisiecki D., Janicki D., Dobrzański L.A. The study of properties of Ni–WC wires surfaced deposits. In: *Proceedings of 13th international scientific conference on achievements on mechanical and material engineering*. 16-19 may 2005:299–302.
 4. Patricio F. Mendez, Naim Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi Gol, Gentry Wood / welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014;16(1):4–25. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
 5. Badisch E., Kirchgabner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide. *Surface and Coatings Technology*. 2008;202:6016–6022.
 6. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrase deposits against abrasion. *Welding International*. 2009;23:706–716. <https://doi.org/10.1080/09507110902843248>
 7. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164-165:1056–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.242>
 8. Kirchgabner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*. 2008;265:772–779. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
 9. Chang C–M, Chen Y–C, Wu W. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy. *Tribology International*. 2010;43:929–934. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.045>
 10. Buchanan V.E. Solidification and microstructural characterization of iron–chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203:3638–3646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.051>
 11. Buchanan V.E., Shipway P.H., McCartney D.G. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*. 2007;263:99–110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.053>
 12. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Welding Journal*. 2010;89:133–9.
 13. Azimi G., Shamanian M. Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;505:598–603. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.06.084>
 14. Mendez P. Modern technologies for the deposition of wear-resistant overlays. In: *Weld overlay for wear protection* \ Edmonton: Canadian Welding Association; \ 2013.
 15. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E. Studying the Influence of Tungsten and Chromium Additives in Flux Cored Wire System Fe–C–Si–Mn–Mo–Ni–V–Co on Surfaced Metal Properties. *Materials Science Forum*. 2017; 906:107–113.
 16. Kozyrev N.A., Galevsky G.V., Kryukov R.E., Titov D.A., Shurupov V. M. New materials for welding and surfacing. *Iop Conference Series: Materials Science And Engineering*. 2016;150:012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012031>
 17. Gusev A. I., Kozyrev N. A., Usoltsev A. A., Kryukov R. E., Osetkovsky I. V. Study of the properties of flux cored wire of Fe–C–Si–Mn –Cr–Mo–Ni–V–Co system for the strengthening of nodes and parts of equipment used in the mineral mining. *IOP Conference Series: Earth and Envi-*

- ronmental Science. 2017; 84:012018. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012018>
18. Samsonov G.V., Vinnitskii I.M. *Refractory compounds*. Moscow: Metallurgiya, 1976:560. (In Russ.).
 19. Patsekin V.P., Rakhimov K.Z. *Production of powder wire*. Moscow: Metallurgiya, 1979:80. (In Russ.).
 20. Paton B.E. *Technology of electric welding of metals and alloys by melting*. Moscow: Metallurgiya, 1974:768. (In Russ.).
 21. Choi, J.H., Lee J., Yoo C.D. Dynamic force balance model for metal transfer analysis in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001;34:2658–2664. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/34/17/313>
 22. Lu F., Wang H. P., Murphy A. B., Carlson B. E. Analysis of energy flow in gas metal arc welding processes through self-consistent three-dimensional process simulation. Carlson. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;68:215–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.021>
 23. Tashiro S., Zeniya T, Murphy A. B., Tanaka M. Visualization of fume formation process in arc welding with numerical simulation. *Surface & Coatings Technology*. 2013;228:301–305.
 24. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0 [Electronic resource]: data compiled and evaluated by M.W. Chase, Jr., C.A. Davies, J.R. Dawney, Jr., D.J. Frurip, R.A. Mc Donald, and A.N. Syvernd. URL: <http://kinetics.nist.gov/janaf>. (accessed: 20.10.2023).
 25. Glushko V.P., Gurvich L.V. et al *Thermodynamic properties of individual substances. T. 1. Ch. 1*. Moscow: Nauka, 1978:22.
 26. *Thermodynamic properties of individual substances*. Vol. 5, 6. Iorish V.S. [Electronic resource]. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/tsiv/>. (accessed: 20.10.2023).

Сведения об авторах

Роман Евгеньевич Крюков, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Юлия Владимировна Бендре, к.х.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: bendre@list.ru

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., заместитель директора научного центра металлургических технологий, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

ORCID: 0000-0002-7391-6816

Антон Андреевич Сычев, соискатель, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: nvkz.m1@gmail.com

Андрей Владимирович Жуков, аспирант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: Svarka42@mail.ru

Information about the authors

Roman E. Kryukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Yuliya V. Bendre, PhD, Associate Prof. of the Chair of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

ORCID:

E-mail: bendre@list.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Scientific Center for Metallurgical Technologies, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

ORCID: 0000-0002-7391-6816

Anton A. Sychev, applicant, Siberian State Industrial University

E-mail: nvkz.m1@gmail.com

Andrei V. Zhukov, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: Svarka42@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 27.10.2023

Принята к публикации 30.10.2023

Received 20.10.2023

Revised 27.10.2023

Accepted 30.10.2023