



УДК 621.791:624

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-449-456



Оригинальная статья

Original article

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА WO_3 УГЛЕРОДОМ, КРЕМНИЕМ, АЛЮМИНИЕМ И ТИТАНОМ

Л. П. Бащенко¹, Ю. В. Бендре¹, Н. А. Козырев²,
А. Р. Михно¹, В. М. Шурупов¹, А. В. Жуков¹

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

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

✉ mikno-mm131@mail.ru

Аннотация. В настоящее время разработке и исследованию новых материалов для деталей машин горно-металлургического комплекса методом наплавки порошковой проволокой уделяется большое внимание. Широкое распространение для наплавки сталей с высокой износостойкостью получили порошковые проволоки, в которых в качестве наполнителей используется восстановленный вольфрам в виде ферросплавов, лигатур и металлического порошка различной степени чистоты. Однако в связи с дефицитностью и высокой стоимостью вольфрама актуальной задачей является его рациональное использование. Для практического применения представляет интерес технология наплавки вольфрамсодержащей порошковой проволокой, при использовании которой достигается максимальное извлечение вольфрама в наплавленный слой за счет восстановительных процессов в дуге. С целью повышения полезного использования вольфрама заслуживают рассмотрения технологии косвенного легирования вольфрамом при наплавке под флюсом из порошковых проволок, в которых в качестве наполнителя используются, с одной стороны – оксид вольфрама, а с другой – восстановители. Можно ожидать, что при дуговом разряде в процессе наплавки могут образовываться вольфрам и (или) химические соединения вольфрама с восстановителями. В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа протекания термодинамических процессов восстановления оксида вольфрама углеродом, кремнием, алюминием и титаном при дуговом разряде, возникающем во время наплавки порошковыми проволоками под слоем флюса. Проведенный термодинамический анализ 41 реакции в стандартных состояниях показал, что наличие в используемой для наплавки порошковой проволоке восстановителей (углерода, кремния, алюминия, титана) будет способствовать образованию силицидов и карбидов вольфрама, а, возможно, и самого вольфрама. Определено, что лучшим состоянием для участия оксида вольфрама в реакциях в дуге является газообразное состояние $WO_3(g)$.

Ключевые слова: восстановление, оксид вольфрама, термодинамика, стандартная энергия Гиббса реакции, углерод, кремний, алюминий, титан, неметаллические включения, термодинамическая вероятность протекания реакции

Для цитирования: Бащенко Л.П., Бендре Ю.В., Козырев Н.А., Михно А.Р., Шурупов В.М., Жуков А.В. Термодинамические аспекты восстановления оксида вольфрама WO_3 углеродом, кремнием, алюминием и титаном. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(4):449–456. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-449-456>

THERMODYNAMIC ASPECTS OF WO₃ TUNGSTEN OXIDE REDUCTION BY CARBON, SILICON, ALUMINUM AND TITANIUM

L. P. Bashchenko¹, Yu. V. Bendre¹, N. A. Kozyrev²,
A. R. Mikhno¹, V. M. Shurupov¹, 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)

✉ mikno-mm131@mail.ru

Abstract. The development and research of new materials for machine parts of the mining and metallurgical complex by the method of surfacing with flux cored wire has a lot of attention nowadays. Flux cored wires are widely used for surfacing of steels with high wear resistance, in which reduced tungsten in the form of ferroalloys, ligatures and metal powder of various degrees of purity are used as fillers. However, due to the scarcity and high cost of tungsten, its rational use is an urgent task. For practical application, the technology of surfacing with tungsten-containing flux cored wire is of interest; using it the maximum extraction of tungsten into the deposited layer is achieved due to reduction processes in the arc. In order to increase the beneficial use of tungsten, the technologies of indirect alloying with tungsten during surfacing under the flux of flux cored wires, in which tungsten oxide is used as a filler on the one hand, and reducing agent – on the other, deserve consideration. It can be expected that during arc discharge, tungsten and (or) chemical compounds of tungsten with reducing agents can be formed during the surfacing process. This paper presents the results of a comparative analysis of the thermodynamic processes of tungsten oxide reduction by carbon, silicon, aluminum and titanium during arc discharge occurring during surfacing with flux cored wires under a layer of flux. The thermodynamic analysis of 41 reactions in standard states showed that the presence of reducing agents (carbon, silicon, aluminum, titanium) in the flux cored wire used for surfacing will contribute to the formation of silicides and tungsten carbides, and, possibly, tungsten itself. It was determined that the best state for the participation of tungsten oxide in reactions in the arc is WO₃(g) gaseous state.

Keywords: reduction, tungsten oxide, thermodynamics, standard Gibbs energy of reaction, carbon, silicon, aluminum, titanium, non-metallic inclusions, thermodynamic probability of reaction

For citation: Bashchenko L.P., Bendre Yu.V., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Shurupov V.M., Zhukov A.V. Thermodynamic aspects of WO₃ tungsten oxide reduction by carbon, silicon, aluminum and titanium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):449–456.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-449-456>

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного времени (более 40 лет) широкое распространение имеет способ наплавки сварочной порошковой проволокой. Ее использование в сочетании с прогрессивными методами наплавки позволяет на качественно новом уровне решать сложные технологические задачи [1 – 3].

Разработка технологии нанесения износостойкой наплавки включает следующие основные этапы: анализ характера износа детали; оценку свариваемости конструкционного материала и допускаемых изменений геометрии детали, связанных с тепловым воздействием наплавки; выбор износостойкого сплава; выбор способа наплавки; разработку режимов наплавки [4 – 8].

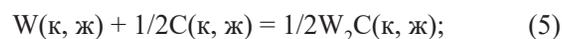
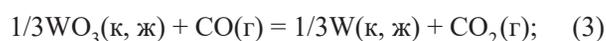
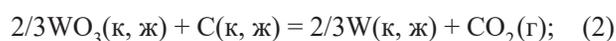
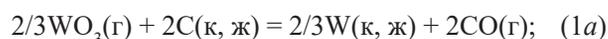
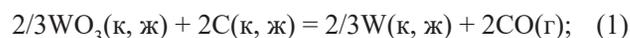
Особое внимание при изготовлении порошковой проволоки в последнее время уделяется выбору шихтовых материалов [9 – 11]. Одним из компонентов шихтовых материалов порошковой проволоки является порошок вольфрама. Вольфрамовые покрытия характеризуются высокой износостойкостью в условиях трения «металл по металлу» при повышенных температурах, хорошей тепло- и термостойкостью. Основное применение они находят в металлургии и машиностроении: для наплавки валков горячей прокатки, ножей для горячей резки металла, штампов горячей прокатки и т.д. [12 – 15]. Однако из-за дороговизны

чистого порошка и отсутствия на территории РФ изготовителей этого компонента возникают предложения о замене «чистого» порошка вольфрама на оксид вольфрама [16 – 18].

Целью настоящей работы является проведение сравнительной термодинамической оценки вероятности протекания процессов восстановления оксида вольфрама WO₃ углеродом, кремнием, алюминием и титаном при дуговом разряде, возникающем при наплавке порошковыми проволоками под слоем флюса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведена термодинамическая оценка вероятности протекания следующих реакций:



и газообразном (г) состояниях в зависимости от температуры рассчитывали известными методами [19] в интервале температур сварочной дуги (1500 – 3500 К) по термодинамическим свойствам $[[H^\circ(T) - H^\circ(298,15 \text{ К})], S^\circ(T), \Delta_f H^\circ(298,15 \text{ К})]$ реагентов WO₃, W, C, CO, CO₂, Si, SiO, SiO₂, WSi₂, W₅Si₃, Al, Al₂, Al₂O₃, AlO, AlO₂, Al₂O, Al₂O₂, Ti, TiO, Ti₂O₃, Ti₃O₅, Ti₄O₇, TiO₂. В расчетах использованы данные справочников [19; 20]. Все реакции записывали на 1 моль кислорода.

В интервале 1500 – 3500 К фазовые переходы (плавление, кипение) претерпевают: WO₃ (1745 К), W₂C (3008 К), WC (3058 К), W₅Si₃ (2623 К), Si (1685 К), SiO₂ (1696 К), Al (2791 К), Al₂O₃ (2327 К), Ti (1939 К), TiO (2023 К), Ti₂O₃ (2115 К), Ti₃O₅ (2050 К), Ti₄O₇ (1950 К), TiO₂ (2130 К).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее легкоплавким веществом из рассматриваемых твердых кристаллических восстановителей является алюминий. Он же после плавления наиболее легко должен переходить в пар.

Для оценки степени влияния на термодинамические свойства реакций возможного испарения оксида вольфрама WO₃ в дуге рассчитывали термодинамические характеристики 15 реакций, в которых в качестве стандартного для оксида вольфрама выбрано газообразное состояние WO₃(г) (реакции 1а, 17а, 22 – 33, 34а).

Реакции (4), (5) и (15), (16) не являются реакциями восстановления оксида вольфрама. Их термодинамика в сравнении с термодинамикой реакций (6), (7) и (13), (14) соответственно показывает меньшую вероятность образования карбидов и силицидов вольфрама в результате прямого взаимодействия вольфрама с углеродом (4), (5) и кремнием (15), (16), чем образования этих же карбидов и силицидов при восстановлении оксида вольфрама углеродом (6), (7) или кремнием (13), (14).

Стандартные энергии Гиббса всех 41 реакции по четырем группам в зависимости от природы восстановителя и температуры приведены в таблице. Результаты и частные выводы по эффективности каждого восстановителя (углерода, кремния, алюминия, титана) рассмотрены в работах [21 – 23] соответственно. По сравнению с работой [23], реакции (34) – (38) восстановления оксида WO₃ титаном в настоящей работе записаны на 1 моль кислорода O₂, а не на 1 моль Ti.

Следующим этапом работы являлся выбор наиболее эффективных восстановителей и условий протекания реакций.

Известно, что частная производная от стандартной энергии Гиббса реакции по температуре при постоянном давлении равна стандартной энтропии реакции с противоположным знаком:

$$\left(\frac{\partial \Delta_r G^\circ(T)}{\partial T}\right)_p = -\Delta_r S^\circ(T). \quad (39)$$

Из этого уравнения следует, что характер изменения стандартной энергии Гиббса реакции от температуры определяется знаком стандартной энтропии реакции. При этом $S_r^\circ > S_{\text{ж}}^\circ > S_{\text{к}}^\circ$ для одного и того же вещества. Поскольку в реакциях (1) – (38) присутствуют вещества во всех трех агрегатных состояниях, то для многих реакций наблюдается значительное изменение $\Delta_r G^\circ(T)$ в зависимости от температуры, причем как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

Из анализа данных таблицы следует, что при температуре 1500 К $\Delta_r G^\circ(T)$ изменяется от +58,44 кДж для реакции (32) до –929,12 кДж для реакции (31), при 3500 К – от +1389,31 кДж для реакции (32) до –803,92 кДж для реакции (11). При таких значительных отличиях значений $\Delta_r G^\circ(T)$ имеет смысл оставить для анализа наиболее термодинамически вероятные реакции. Номера этих реакций показаны в таблице звездочками, а зависимости $\Delta_r G^\circ(T)$ от температуры приведены на рисунке.

Очевидно, что графики на рисунке визуально разделяются на три группы. Первая группа – наиболее вероятные реакции в интервале температур 1500 – 2500 К. Это реакции (31), (33), (28), (23) между газообразными оксидом вольфрама WO₃ и алюминием с образованием жидких или газообразных оксидов алюминия. При образовании в газе димера алюминия Al₂ имеется высокая вероятность получения вольфрама вместе с оксидом AlO₂(г) вплоть до температуры 3000 К (реакция (33)).

Вторая, более многочисленная группа – это реакции (1), (1а), (11), (17), (17а), (18), (19), которые имеют большую вероятность протекания в интервале температур 2500 – 3500 К. В этих реакциях восстановители – углерод и кремний, для которых характерно и известно усиление восстановительных свойств с ростом температуры. Для углерода и кремния характерно также при реакциях с оксидами металлов (особенно активных металлов) диспропорционирование, поэтому высокую термодинамическую вероятность протекания имеют реакции (11), (18) и (19), в которых, наряду с оксидами CO(г) и SiO(г) (степень окисления углерода и кремния положительная), образуются карбиды и силициды различного состава (степень окисления углерода и кремния отрицательная).

В третью группу выделены реакции (34), (34а), (35), (36), (37), (38). Это реакции с титаном, для которого не характерно испарение и образование оксидов в газообразном состоянии. Поэтому графики отличаются небольшим наклоном вверх, в сторону менее отрицательных значений $\Delta_r G^\circ(T)$ при увеличении температуры. Как и в случае с другими восстановителями, испарение оксида вольфрама приводит к увеличению термодинамической вероятности его восстановления титаном (реакция (34а)). Можно сказать, что титан – качественный восстановитель, который выполняет свои функции при всех температурах наплавочной дуги.

Анализ термодинамических свойств реакций показал, что наличие в используемой для наплавки порошковой проволоке, наряду с оксидом вольфрама WO₃ вос-

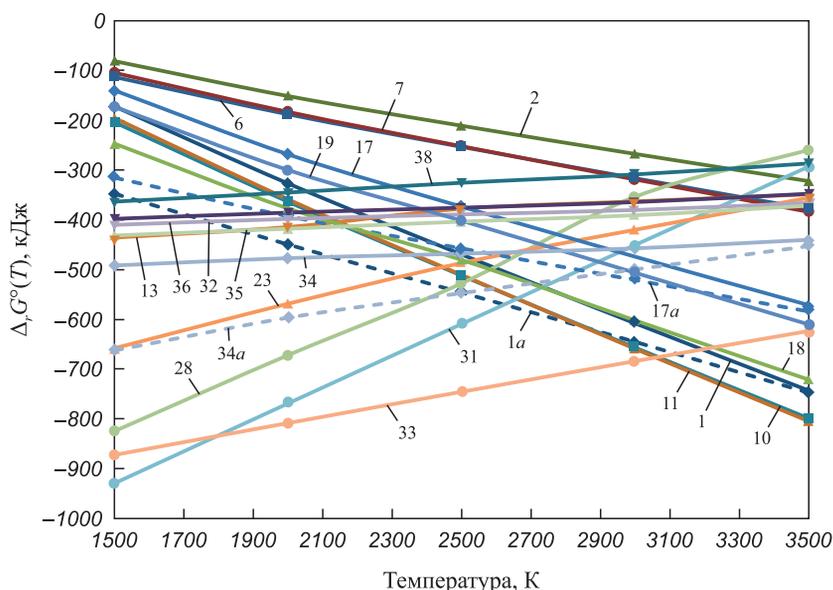
Стандартные энергии Гиббса реакций (1) – (38) в зависимости от температуры

Standard Gibbs energies of reactions (1) – (38) depending on temperature

Восстановитель	Реакция	$\Delta_r G^\circ(T)$, кДж, при T, К				
		1500	2000	2500	3000	3500
Углерод (C)	(1)*	-172,23	-326,83	-469,26	-607,39	-742,27
	(1a)*	-347,58	-449,50	-545,97	-644,87	-746,81
	(2)	-81,04	-151,09	-210,61	-267,20	-321,74
	(3)	5,08	12,32	24,02	36,49	49,40
	(4)	-47,76	-54,97	-63,57	-73,34	-83,87
	(5)	-35,11	-47,77	-61,80	-76,87	-92,47
	(6)*	-112,88	-187,74	-252,99	-316,10	-377,65
	(7)*	-104,45	-182,94	-251,81	-318,45	-383,38
	(8)	14,66	39,43	66,79	94,08	121,21
	(9)	7,35	22,02	39,88	57,92	76,00
	(10)*	-204,07	-363,48	-511,64	-656,29	-798,18
(11)*	-195,64	-358,68	-510,46	-658,64	-803,92	
Кремний (Si)	(12)	-328,43	-305,67	-270,56	-234,84	-198,98
	(13)*	-435,49	-414,30	-377,62	-362,83	-348,71
	(14)	-361,28	-337,12	-298,79	-267,13	-237,75
	(15)	-160,59	-162,95	-160,59	-191,99	-224,60
	(16)	-49,27	-47,17	-42,35	-48,44	-58,16
	(17)*	-139,95	-268,31	-373,17	-473,62	-570,77
	(17a)*	-315,29	-392,63	-457,24	-520,75	-583,70
	(18)*	-247,01	-376,94	-480,23	-601,61	-720,50
(19)*	-172,80	-299,76	-401,40	-505,91	-609,54	
Алюминий (Al)	(20)	-487,08	-456,23	-430,31	-387,47	-302,46
	(21)	-493,67	-448,82	-407,37	-348,34	-246,88
	(22)	-657,76	-568,48	-486,78	-390,80	-259,87
	(23)*	-657,75	-568,48	-486,78	-420,08	-356,00
	(24)	-844,31	-681,37	-527,86	-390,80	-259,87
	(25)	-825,37	-694,55	-573,26	-468,49	-369,83
	(26)	-826,07	-667,47	-518,28	-385,57	-258,64
	(27)	-418,44	-303,12	-197,12	-107,41	-23,50
	(28)*	-824,33	-671,84	-527,86	-354,05	-259,87
	(29)	-232,62	-200,33	-169,51	-140,93	-114,48
	(30)	-103,20	-66,548	-30,876	3,831	37,348
	(31)*	-929,12	-768,84	-609,48	-451,04	-293,75
	(32)	58,44	385,76	717,33	1052,17	1389,32
(33)*	-872,28	-808,38	-745,69	-684,09	-623,66	
Титан (Ti)	(34)*	-491,61	-476,89	-467,84	-457,20	-440,10
	(34a)*	-662,29	-596,54	-547,24	-499,67	-453,08
	(35)*	-431,27	-417,72	-403,45	-390,66	-371,58
	(36)*	-409,99	-398,06	-388,98	-380,15	-365,78
	(37)*	-397,80	-385,35	-375,47	-364,24	-347,54
	(38)*	-363,22	-344,96	-325,39	-308,68	-286,65

становителей (углерода, кремния, алюминия, титана) как в отдельности, так и всех вместе, будет способствовать образованию силицидов и карбидов вольфрама, и, вероятно, самого вольфрама. Оксид вольфрама имеет

наивысшую реакционную способность в газообразном состоянии WO₃(г), что находится в полном соответствии с физическими свойствами WO₃. В литературе оксид WO₃ характеризуется как «летучий при прокаливании».



Стандартные энергии Гиббса реакций (1) – (38) в зависимости от температуры
Standard Gibbs energies of reactions (1) – (38) depending on temperature

Алюминий обладает наивысшим химическим сродством к оксиду вольфрама $WO_3(g)$ в виде $Al(g)$ и димера $Al_2(g)$ в интервале температуры 1500 – 3000 К. В качестве продукта окисления алюминия наиболее вероятно образование $Al_2O(g)$. За счет этого можно рассчитывать на отсутствие неметаллических включений $Al_2O_3(k)$ в наплавленном металле. Самым эффективным восстановителем при относительно низких температурах в дуге является алюминий.

Использование в качестве восстановителя кремния и углерода способствует образованию в металлическом расплаве как вольфрама, так и его силицидов и карбидов за счет реакций диспропорционирования, которые являются характерными для этих элементов. Углерод и кремний – самые эффективные восстановители при самых высоких температурах в дуге.

Качественным восстановителем является титан, который выполняет восстановительные функции во всем интервале температуры наплавочной дуги. При использовании титана в порошковой проволоке вероятно получение оксидов $TiO_2(k)$ и $Ti_4O_7(k)$ в качестве неметаллических включений в наплавленном металле.

Выводы

По имеющимся термодинамическим данным для веществ-реагентов проведен расчет свойств $[\Delta_r H^\circ(T), \Delta_r S^\circ(T), \Delta_r G^\circ(T)]$ реакций восстановления оксида вольфрама WO_3 углеродом, кремнием, алюминием и титаном (41 реакция) в стандартных состояниях в интервале температуры 1500 – 3500 К.

Наличие в используемой для наплавки порошковой проволоке, наряду с оксидом вольфрама WO_3 , восстановителей (углерода, кремния, алюминия, титана) как

в отдельности, так и всех вместе, будет способствовать образованию силицидов и карбидов вольфрама, и, вероятно, самого вольфрама.

Алюминий обладает наивысшим химическим сродством к оксиду вольфрама $WO_3(g)$ в виде $Al(g)$ и димера $Al_2(g)$ в интервале температуры 1500 – 3000 К. В качестве продукта окисления алюминия наиболее вероятно образование $Al_2O(g)$. За счет этого можно рассчитывать на отсутствие неметаллических включений $Al_2O_3(k)$ в наплавленном металле. Самым эффективным восстановителем при относительно низких температурах в дуге является алюминий. Использование в качестве восстановителя кремния и углерода способствует образованию в металлическом расплаве как вольфрама, так и его силицидов и карбидов. Качественным восстановителем во всем интервале температуры наплавочной дуги является титан, при его использовании вероятно получение оксидов TiO_2 и Ti_4O_7 в качестве неметаллических включений в наплавленном металле.

Полученные данные по восстановлению WO_3 являются основой в проведении практических экспериментов по введению в состав шихты порошковой проволоки оксида вольфрама и восстановителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Li W., Wang H., Yu R., Wang J., Wang J., Wi M., Maksimov S.Yu. High-speed photography analysis for underwater flux-cored wire arc cutting process. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. 2020:141–151. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8192-8_7
- Eremin E.N., Losev A.S., Ponomarev I.A., Borodikhin S.A., Volochayev M.N. Wear resistance of steel obtained by surfacing a flux-cored wire 30N8Kh6M3STYu. *Journal of*

- Physics: Conference Series*. 2020;1546:012060.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012060>
3. Moreno J.R.S., Guimarães J.B., Lizzi E.A. da S., Correa C.A. Analyze and optimize the welding parameters of the process by pulsed tubular wire (FCAW – Flux Cored Arc Welding) based on the geometry of the weld beads resulting from each test. *Journal of Material Science and Technology Research*. 2022;9(1):11–23.
<https://doi.org/10.31875/2410-4701.2022.09.02>
 4. Il'yaschenko D.P., Zernin E.A., Sapozhkov S.B., Loskutov L.G. Method for predicting the composition of the protective coating in MMA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;939:012029.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012029>
 5. Kobernik N.V., Pankratov A.S., Sorokin S.S., Petrova V.V., Galinovskii A.L., Orlik A.G., Stroitelev D.V. Effect of chromium carbide introduced into a flux cored wire charge on the structure and properties of the hardfacing deposit. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020;2020(13):1485–1490.
<https://doi.org/10.1134/S0036029520130145>
 6. Wu W., Zhang T., Chen H., Peng J., Yang K., Lin S., Wen P., Li Z., Yang S., Kou S. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of deposited metal of E120C-K4 high strength steel flux-cored wire. *Materials*. 2023;16(8):3239. <https://doi.org/10.3390/ma16083239>
 7. Smolentsev A.S., Votnova E.B., Veselova V.E., Balin A.N. Study of microstructure and properties of high-strength alloy steel welded joints made with austenitic flux-cored wire with nitrogen. *Metallurgist*. 2023;67(7-8):928–937.
<https://doi.org/10.1007/s11015-023-01582-5>
 8. Liu H.-Yu., Song Zh.-L., Cao Q., Chen S.-P., Meng Q.-S. Microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys reinforced with TiC-NbC. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2016;23(3):276–280.
[https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(16\)30045-0](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(16)30045-0)
 9. Малушин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Башченко Л.П., Ковалев А.П. Разработка комплексной технологии упрочнения валков холодной прокатки плазменной наплавкой. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2023;21(7):296–302.
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2023-21-7-296-302>
Malushin N.N., Gromov V.E., Romanov D.A., Bashchenko L.P., Kovalev A.P. Development of complex hardening technology of cold rolling rolls by plasma surfacing. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2023;21(7):296–302. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2023-21-7-296-302>
 10. Рябцев И.А., Лентюгов И.П., Безушко О.Н., Гончарова О.Н., Рябцев И.И., Лукьяненко А.А. Влияние способов подготовки шихты порошковых проволок на структуру наплавленного металла и экологическую безопасность рабочей зоны при дуговой наплавке. *Сварочное производство*. 2022;(8):47–53.
Ryabtsev I.A., Lentyugov I.P., Bezushko O.N., Goncharova O.N., Ryabtsev I.I., Lukyanenko A.A. Influence of methods of preparation of a charge of flux-cored wires on the structure of the deposited metal and the environmental safety of the working area during arc surfacing. *Welding Production*. 2022;(8):47–53. (In Russ.).
 11. Malushin N.N., Martyshev N.V., Valuev D.V., Karlina A.I., Kovalev A.P., Gizatulin R.A. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere. *Metallurgist*. 2022;65(11-12):1468–1475.
<https://doi.org/10.1007/s11015-022-01292-4>
 12. Vinokurov G.G., Vasil'eva M.I., Kychkin A.K., Moskvitina L.V. Structure and tribological properties of the wear-resistant coatings deposited using flux-cored wires modified by tantalum and tungsten. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(13):1357–1362.
<https://doi.org/10.1134/S0036029519130391>
 13. Ma Q., Li H., Liu S., Liu D., Wang P., Zhu Q., Lei Y. Comparative evaluation of self-shielded flux-cored wires designed for high strength low alloy steel in underwater wet welding: Arc stability, slag characteristics, and joints' quality. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(4):5231–5244. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06683-x>
 14. Zou Z., Liu Z., Han X. Effect of W on microstructure and properties of Fe-Cr-C-W-B surfacing alloy. *Transactions of the China Welding Institution*. 2021;42(7):91–96.
<https://doi.org/10.12073/j.hjxb.20210208001>
 15. Смоленцев А.С., Веселова В.Е., Березовский А.В., Усольцев Е.А., Шак А.В. Структура и свойства сварных соединений из высокопрочных сталей, выполненных металлопорошковой проволокой с азотом. *Металлург*. 2023;(9):71–77.
Smolentsev A.S., Veselova V.E., Berezovsky A.V., Usoltsev E.A., Shak A.V. Structure and properties of welded joints of high-strength steels made by metal-core wire with nitrogen. *Metallurg*. 2023;(9):71–77. (In Russ.).
 16. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Bashchenko L.P., Semin A.P. Stress state in deposited steel cast rolls with high surface hardness after argon plasma-jet hardfacing. *Russian Physics Journal*. 2022;64(12):2185–2192.
<https://doi.org/10.1007/s11182-022-02575-8>
 17. Pandova I., Makarenko V., Mitrofanov P., Dyadyura K., Hrebenyk L. Influence of non-metallic inclusions on the corrosion resistance of stainless steels in arc surfacing. *MM Science Journal*. 2021;2021(6):4775–4780.
https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021032
 18. Малушин Н.Н., Ковалев А.П., Смагин Д.А. Выбор способа наплавки для упрочнения деталей горно-металлургического оборудования. *Вестник научных конференций*. 2015;(2-1(2)):105–106.
Malushin N.N., Kovalev A.P., Smagin D.A. The choice of a surfacing method for hardening parts of mining and metallurgical equipment. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2015;(2-1(2)):105–106. (In Russ.).
 19. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. Т. 1. Кн. 1 / Под ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвича и др. Москва: Наука; 1978:440.
 20. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*. Berlin: Springer-Verlag; 1977.
 21. Крюков Р.Е., Горюшкин В.Ф., Бендре Ю.В., Башченко Л.П., Козырев Н.А. Некоторые термодинамические аспекты восстановления Cr₂O₃ углеродом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(12):950–956.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-950-956>
Kryukov R.E., Goryushkin V.F., Bendre Yu.V., Bashchenko L.P., Kozyrev N.A. Thermodynamic aspects of Cr₂O₃ reduction by carbon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(12):950–956. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-950-956>

22. Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Шурупов В.М. Некоторые термодинамические аспекты восстановления вольфрама из оксида WO₃ кремнием. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(6):481–485. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-481-485>
Bendre Yu.V., Goryushkin V.F., Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Shurupov V.M. Some thermodynamic aspects of WO₃ recovery by silicon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(6):481–485. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-481-485>
23. Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Оздобихина Н.В. Термодинамические аспекты восстановления оксидов металлов алюминием и титаном при термитной сварке рельсов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2021;3(37):13–19.
Bendre Yu.V., Goryushkin V.F., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Oznobikhina N.V. Thermodynamic aspects of metal oxides reduction by aluminum and titanium during thermite welding of rails. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2021;3(37):13–19. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

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 качественных сталей, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Алексей Романович Михно, директор НПЦ «Сварочные процессы и технологии», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Вадим Михайлович Шурупов, аспирант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shurupovvm@sgaz.pro

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

E-mail: Svarka42@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Yuliya V. Bendre, Cand. Sci. (Chem.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: bendre@list.ru

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

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Aleksei R. Mikhno, Director of the Scientific and Production Center “Welding Processes and Technologies”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Vadim M. Shurupov, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: shurupovvm@sgaz.pro

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

E-mail: Svarka42@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Л. П. Бащенко – сбор данных исследований, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

Ю. В. Бендре – проведение термодинамических расчетов, аналитическая оценка полученных результатов.

Н. А. Козырев – формирование основной идеи исследований, разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.

А. Р. Михно – обработка полученных результатов, оформление статьи.

В. М. Шурупов – проведение практических экспериментов по полученным результатам, оформление статьи.

А. В. Жуков – организация испытаний образцов, анализ результатов исследований.

L. P. Bashchenko – collecting research data, analysis of results, preparing materials for the article.

Yu. V. Bendre – conducting thermodynamic calculations, analytical evaluation of results.

N. A. Kozyrev – forming the research main idea, developing a research plan, setting tasks, analysis of results.

A. R. Mikhno – processing of results, design of the article.

V. M. Shurupov – conducting practical experiments on the results obtained, design of the article.

A. V. Zhukov – organization of sample testing, analysis of results.

Поступила в редакцию 06.02.2024

После доработки 25.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Received 06.02.2024

Revised 25.03.2024

Accepted 29.03.2024