



Оригинальная статья

УДК 519.237:669.018.25

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-120-126



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo

Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, А. И. Гусев,
А. Р. Михно, В. Е. Громов

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

Аннотация. Изучены элементный и фазовый составы электродугового покрытия с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. Формирование электродугового покрытия на пластины из стали марки 09Г2С проводилось с помощью сварочного трактора ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки. В состав порошковой проволоки вводилась пыль газоочистки алюминиевого производства (взамен аморфного углерода). Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Микроструктура электродуговых покрытий изучалась с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51. Изучение фазового и элементного составов проводилось методами сканирующей электронной микроскопии на приборе LEO EVO 50. В электродуговом покрытии выявлена ликвация вольфрама и молибдена. Концентрация вольфрама изменяется более чем в три раза, а молибдена – более чем в два раза. Изломы образцов образованы в результате вязкого разрушения материала. На изломах образцов имеются поверхностные слои, толщина которых определяется химическим и элементным составами электродугового покрытия. Рассматриваемый слой характеризуется сравнительно малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов. Их диаметр колеблется в пределах от десятых долей до десятков микрон. Показано, что наиболее крупные ямки формируются на частицах второй фазы микронных (2 – 3 мкм) размеров. Изучена загрязненность металла электродуговых покрытий неметаллическими включениями. Установлено, что химический состав порошковой проволоки исследуемой системы не оказывает существенного влияния на уровень загрязненности неметаллическими включениями электродуговых покрытий. Методом рентгенофазового анализа были определены параметр a кристаллической решетки и значения областей когерентного рассеяния фаз Fe и CrC, формирующихся в результате наплавки.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговое покрытие, образцы, неметаллические включения, фазовый состав, элементный состав, микроструктура

Для цитирования: Козырев Н.А., Усольцев А.А., Гусев А.И., Михно А.Р., Громов В.Е. Исследование элементного и фазового составов электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 120–126. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-120-126>

Original article

ELEMENTAL AND PHASE COMPOSITION OF ELECTRIC ARC COATING FORMED WITH A FLUX-CORED WIRE OF Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM

N. A. Kozyrev, A. A. Usol'tsev, A. I. Gusev,
A. R. Mikhno, V. E. Gromov

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

Abstract. The authors have studied the elemental and phase compositions of electric arc coating with a flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. Formation of electric arc coating was carried out using ASAW-1250 welding tractor with fabricated flux-cored wire on plates made of 09G2S steel. Aluminum production gas cleaning dust has been introduced into the composition of flux cored wire (instead of amorphous carbon). Chemical composition of the deposited metal was determined by X-ray fluorescence method on XRF-1800 spectrometer and by the atomic emission method

on DFS-71 spectrometer. Microstructure of the electric arc coatings was studied using OLYMPUSGX-51 optical microscope. Analysis of phase and elemental compositions was performed by scanning electron microscopy using LEO EVO 50 instrument. Segregation of tungsten and molybdenum was revealed in electric arc coating. Concentration of tungsten changes more than 3 times, and molybdenum – more than 2 times. Fractures of the samples are formed as a result of ductile fracture of the material. There are surface layers on the samples fractures, thickness of which is determined by chemical and elemental composition of the electric arc coating. The layer under consideration is characterized by a relatively small diameter of fracture pits compared to the samples volume. Their diameter ranges from tenths to tens of micrometers. The largest pits are formed on particles of the second phase with micron sizes ($2 - 3 \mu\text{m}$). Contamination of metal of electric arc coatings with non-metallic inclusions was studied. It was established that chemical composition of flux-cored wire of the studied system does not significantly affect the level of contamination with non-metallic inclusions in electric arc coatings. Parameter a of crystal lattice and values of areas of coherent scattering of Fe and CrC phases formed as a result of hardfacing were determined by X-ray phase analysis.

Keywords: flux-cored wire, electric arc coating, samples, non-metallic inclusions, phase and elemental composition, microstructure

For citation: Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Gusev A.I., Mikhno A.R., Gromov V.E. Elemental and phase composition of electric arc coating formed with a flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 120–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-120-126>

ВВЕДЕНИЕ

Для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий широкое распространение получили наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [1–3], а также порошковые проволоки, основанные на тех же принципах легирования [4–6].

Для предотвращения износа рабочие поверхности технологического оборудования необходимо упрочнять. Эффективным способом упрочнения рабочей поверхности является формирование на ней электродугового покрытия методом наплавки. Это сравнительно недорогой метод продления срока службы металлических изделий нанесением на их поверхность электродугового слоя [7–9].

Электродуговое покрытие увеличивает срок и эффективность эксплуатации оборудования, уменьшает количество запасных частей эксплуатируемого оборудования и расходы на обслуживание [9–11].

Представляет интерес разработка [12–15] технологических наплавочных материалов, обеспечивающих в наплавленном металле структуры низкоуглеродистого мартенсита (эффект самозакалки при охлаждении).

Перспективным направлением в создании технологий формирования износостойких покрытий и наплавов электродуговым способом является применение экономно-легированных технологических наплавочных материалов [13–15]. Сдерживающим фактором развития рассматриваемого направления является отсутствие данных о зависимостях и закономерностях влияния различных факторов на структуру и свойства покрытий. Поэтому особый интерес представляют исследования, в которых изучаются фазовый и элементный составы электродуговых покрытий, получаемых путем наплавки [16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электродуговое покрытие на пластины из стали марки 09Г2С осуществляли сварочным трактором

ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки [12–15]. Изготовление порошковой проволоки проводили на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 6 мм, оболочка выполнена из ленты стали марки Ст3. В качестве наполнителя использовали порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849–86; порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ 1415–93; порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757–91; порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755–91; порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722–97; порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759–91; порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130–94; порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721–79; порошок вольфрамовый ПВН ТУ 48-19-72–92. В состав порошковой проволоки вводили пыль газоочистки алюминиевого производства (взамен аморфного углерода) со следующим химическим составом, % (по массе): 21–46 Al_2O_3 ; 18–27 F; 8–15 Na_2O ; 0,4–6,0 K_2O ; 0,7–2,3 CaO; 0,5–2,5 SiO_2 ; 2,1–3,3 Fe_2O_3 ; 12,5–30,2 $\text{C}_{\text{общ}}$; 0,07–0,90 MnO; 0,06–0,90 MgO; 0,09–0,19 S; 0,10–0,18 P [16–18].

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Микроструктуру электродуговых покрытий изучали с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле (увеличение 100–1000) после травления поверхности образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты. Размер зерна определяли по ГОСТ 5639–82 (увеличение 100) [16–18]. Оценку дисперсности мартенсита проводили путем сопоставления исследуемой структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233–56.

Изучение фазового и элементного составов, структуры проводили методами сканирующей электронной микроскопии на приборе LEO EVO 50 в центре коллективного пользования Томского научного центра. Для методов сканирующей микроскопии характерна высокая информативность, универсальность, а также простота

и удобство управления. Рассматриваемая методика позволяет исследовать сравнительно большие участки поверхности и использовать широкий диапазон увеличений, а также выявить основные элементы структуры поверхности (нано- и микроструктура) и объемы зоны упрочнения, в которых размеры этих элементов не превышают 100 нм и 100 мкм. Для получения исследуемого изображения использованы обратно рассеянные (отраженные) и вторичные электроны. Для анализа состава электродугового покрытия обычно используют обратно отраженные электроны, которые выявляют яркие области на изображении, указывающие на материал с более высоким средним атомным номером. Для выявления рельефа поверхности важную роль выполняют вторичные электроны. При увеличении атомного номера происходит рост количества вторичных и обратно отраженных электронов, следовательно, контраста. Фазовый состав определяли с помощью дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu), баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе приводится изучение элементного и фазового составов электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В работах [18–20] установлен оптимальный состав порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo для получения электродугowych покрытий, обеспечивающих требуемый уровень эксплуатационных свойств.

Для определения элементного и фазового составов электродугowych покрытий были наплавлены многокомпонентные слои на образце.

Химический состав, %, образца электродугового покрытия следующий: 0,17 C; 0,54 Si; 1,19 Mn; 5,9 Cr; 0,37 Mo; 0,38 Ni; 0,009 Al; 0,002 Co; 0,01 Cu; 1,64 W; 0,002 Ti; 0,002 V; 0,04 S; 0,15 P; следы Nb.

Проведена оценка загрязненности наплавленных слоев неметаллическими включениями. Характеристики неметаллических включений и структуры исследуемых образцов следующие: структура – мартенсит; балл – 6; размер игл – 5 ÷ 10 мкм; величина зерна аустенита – 6; силикаты недеформирующиеся – 2б, 1б; оксиды точечные – 1а. Неметаллические включения исследовались на наплавленной поверхности по ГОСТ 1778 – 70.

На предварительно полированных образцах (травленная и нетравленная поверхности образцов) изучали структуру с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 1). На исследуемых образцах выявлены микропоры округлой формы, размеры которых изменяются в пределах от 1,5 до 7,0 мкм. На образце присутствуют поры диам. до 3,5 мм, выявляемые невооруженным глазом [16].

Микрорентгеноспектральный анализ позволяет определять элементный состав исследуемых образцов. На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты элементного анализа образцов. Анализ результатов выявил в исследуемых образцах ликвацию вольфрама и молибдена. Концентрация вольфрама изменяется более чем в три раза, а молибдена более чем в два раза при переходе от точки к точке на поверхности образцов [16].

На изображении имеются светлые области (рис. 2, а, 1 и 4), обедненные дендритной кристаллизацией; и темные области (рис. 2, а, 2 и 3 – междендритные пространства), обогащенные легирующими элементами, в основном молибденом и вольфрамом.

Методом рентгенофазового анализа изучали фазовый состав электродугowych покрытий. На рис. 3 приведены характерные рентгенограммы, полученные с электродугowych покрытий. Твердый раствор на основе α -Fe (твердый раствор на основе объемно-центрированной кристаллической решетки железа) является основной фазой исследуемого образца. Дифракционная линия α -Fe искажена (рис. 3, участок указан стрелкой).

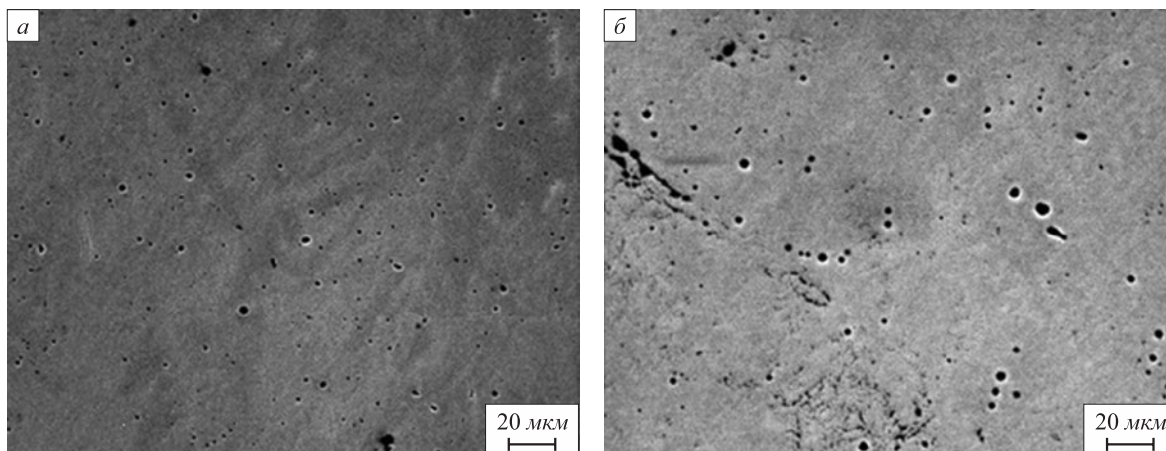


Рис. 1. Микроструктура поверхности образца (а, б)

Fig. 1. Microstructure of the sample surface (a, b)

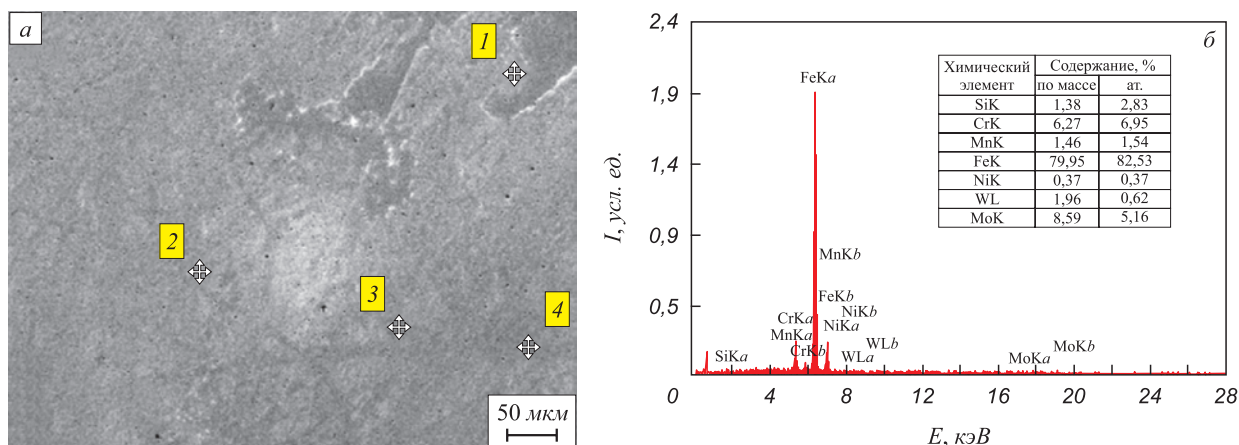


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры травленной поверхности образцов (а) и энергетические спектры (б), полученные методом «по площадям» с участков образцов (а) (приведен элементный состав данного участка, усредненный по всей площади)

Fig. 2. Electron microscopic image of structure of the samples etched surface (a) and energy spectra (b) obtained by “area” method from sample parts (a) (elemental composition of the given part is averaged over the entire area)

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности электродугового покрытия подтверждают наличие в электродуговом покрытии включений второй фазы. Наличие на рентгенограмме единственного рефлекса при фазовом анализе влечет за собой возможную ошибку. Дифракционный максимум на рентгенограмме может принадлежать либо кристаллической решетке γ -Fe, либо кристаллической решетке карбида хрома состава CrC (расчет произведен по карточке 04-016-7242 международной базы данных) [16].

Структура излома образцов приведена на рис. 4. Анализ изломов образцов показывает, что он был сформирован в результате вязкого разрушения сплава [16].

Наличие ямок вязкого излома является отличительным признаком вязкого разрушения. Размер ямок вязкого излома для промышленных сплавов варьируется

в достаточно широких пределах. Помимо ямок вязкого излома в исследуемых образцах наблюдаются сетки ямок малых размеров, зарождающиеся вокруг дисперсных частиц второй фазы, а также ямки среднего размера (рис. 4, з). Наличие их можно объяснить следующим образом. В процессе разрушения происходит образование, рост и слияние множества микропор, в результате появляются разнообразные ямки вязкого излома. Зарождение микропор происходит на поверхностях раздела между матрицей и частицами второй фазы, размеры и распределение которых могут изменяться в очень широких пределах [16].

Размер частиц и расстояние между ними, схема напряженного состояния, а также вязкость разрушения материала определяют размеры и глубину ямок вязкого излома. Диаметр ямок излома колеблется в пределах от 0,5 до 75,0 мкм (рис. 4, з). Следует отметить, что на изломах образцов выявлен поверхностный слой, толщина которого определяется химическим и элементным

Т а б л и ц а 1

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образцов (рис. 3, а)

Table 1. Results of X-ray microspectral analysis of surface (Fig. 3, a)

Элемент	Содержание элементов, % (по массе), в области анализа				
	Вся площадь	1	2	3	4
Si	1,26	1,32	1,12	1,49	1,60
Cr	6,23	6,07	5,82	6,15	6,15
Mn	1,48	1,45	1,32	1,28	1,19
Fe	80,10	83,39	81,36	85,45	80,9
Ni	0,30	0,18	—	0,16	0,18
W	2,18	1,54	0,34	0,59	1,88
Mo	8,45	6,05	10,04	4,88	8,10

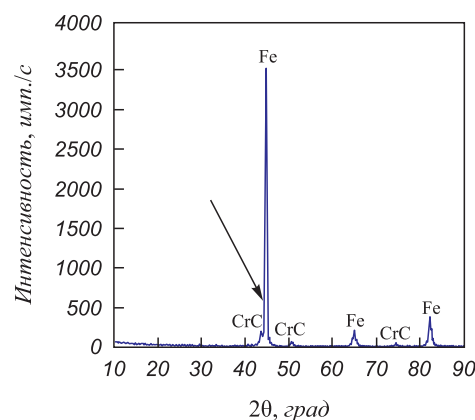


Рис. 3. Рентгенограмма, полученная с образца

Fig. 3. X-ray pattern from the sample

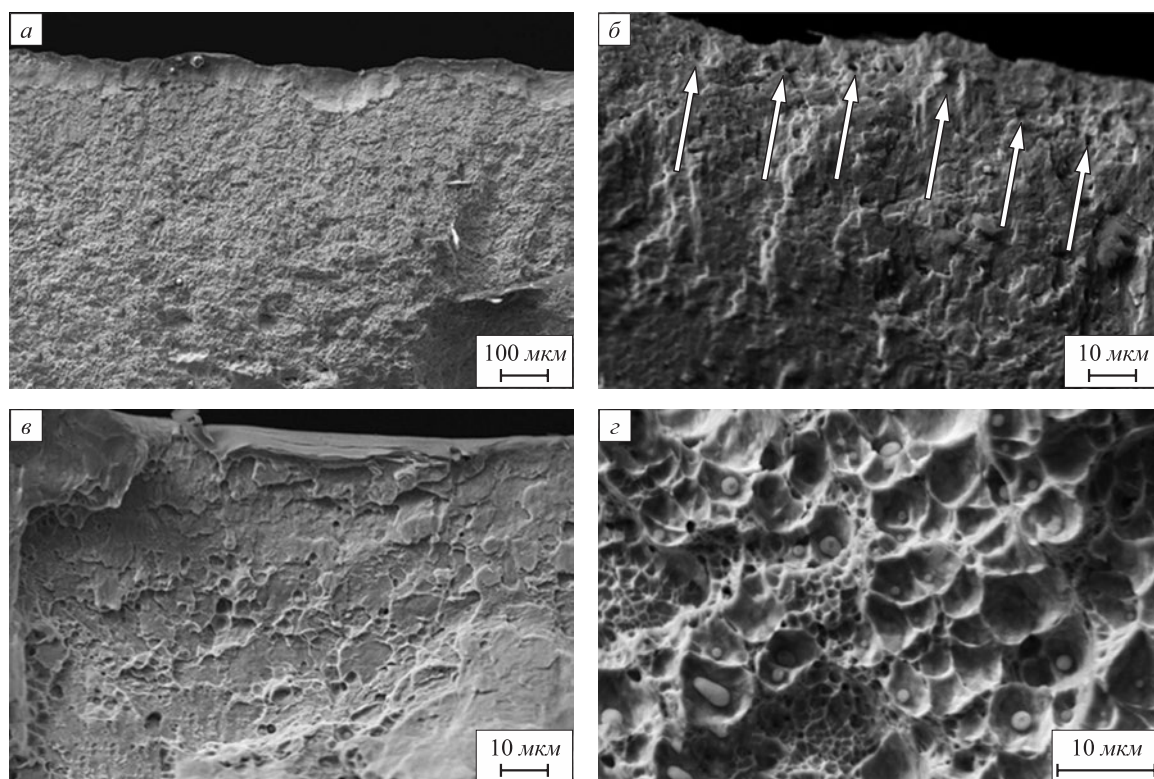


Рис. 4. Структура поверхности излома образца (СЭМ)

Fig. 4. Structure of fracture surface of the sample (SEM)

составами электродугового покрытия. Рассматриваемый слой характеризуется сравнительно малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов (рис. 4, а) [16].

Определены параметр a кристаллической решетки и значения областей когерентного рассеяния фаз Fe и CrC, формирующихся в результате образования электродугового покрытия (табл. 2).

Выводы

Проведены исследования структуры, элементного и фазового составов электродугowych покрытий, сфор-

мированных с применением порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В электродуговом покрытии выявлены ликвации вольфрама и молибдена. Концентрация вольфрама изменяется более чем в три раза, а молибдена – более чем в два раза. Изломы образцов образованы в результате вязкого разрушения материала. На изломах образцов имеются поверхностные слои, толщина которых определяется химическим и элементным составами электродугового покрытия. Рассматриваемый слой характеризуется сравнительно малым диаметром ямок излома по сравнению с объемом образцов. Их диаметр колеблется в пределах от десятых долей до десятков микрон. Показано, что наиболее крупные ямки формируются на частицах второй фазы микронных (2 – 3 мкм) размеров.

Изучена загрязненность металла электродугowych покрытий неметаллическими включениями. Установлено, что химический состав порошковой проволоки исследуемой системы не оказывает существенного влияния на уровень загрязненности неметаллическими включениями электродугowych покрытий.

Методом рентгенофазового анализа были определены параметр a кристаллической решетки и значения областей когерентного рассеяния фаз Fe и CrC, формирующихся в результате наплавки.

Т а б л и ц а 2

Результат исследования образцов методом рентгенофазового анализа

Table 2. Result of X-ray phase analysis of the samples

Обнаруженные фазы	a , Å	ОКР, нм	Содержание фаз, % (по массе)
Fe	2,88	–	88,86
CrC	3,61	158,7	11,14

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling // *Welding International*. 2005. Vol. 20. No. 6. P. 961–976. <https://doi.org/10.1081/AMP-200060424>
2. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // *Surface Engineering*. 2017. Vol. 33. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 11. P. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
4. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC – Co composite hard coatings // *Surface Engineering*. 1997. Vol. 13. No. 3. P. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
5. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // *Materials Science and Technology*. 2013. Vol. 30. No. 3. P. 316–322. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
6. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 4. P. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
7. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behaviour of wire arc sprayed iron based coatings // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30. No. 11. P. 784–790. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
8. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium–carbon austenite // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 10. P. 819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
9. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems // *Materials Technology*. 1999. Vol. 14. No. 3. P. 126–129. <https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
10. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel // *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 90–97. <https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // *Wear Journal*. 2008. Vol. 265. No. 5–6. P. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Луговая В.А., Ярошик В.В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2015. Вып. 40 (59). С. 166–173.
13. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1543–1549.
14. Еремин А.Е., Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Маталасова А.Е., Кац В.С. Структура и свойства высокохромистого металла запорной арматуры наплавленного серийно выпускаемыми сварочными проволоками // *Омский научный вестник*. 2014. Вып. 1 (127). С. 55–58.
15. Емельюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом // *Сварочное производство*. 2011. № 10. С. 18–22.
16. Гусев А.И., Романов Д.А., Козырев Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Структура сварного шва износостойкой наплавки порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2021. № 2 (36). С. 3–11.
17. Вострецов Г.Н., Бич Т.А., Башченко Л.П. Порошковая проволока для плазменной наплавки прокатных валков в среде азота // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2014. № 3 (9). С. 36–40.
1. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling. *Welding International*. 2005, vol. 20, no. 6, pp. 961–976. <https://doi.org/10.1081/AMP-200060424>
2. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 11, pp. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
4. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings. *Surface Engineering*. 1997, vol. 13, no. 3, pp. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
5. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2013, vol. 30, no. 3, pp. 316–322. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
6. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 4, pp. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
7. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behaviour of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014, vol. 30, no. 11, pp. 784–790. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
8. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium–carbon austenite. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 10, pp. 819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
9. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems. *Materials Technology*. 1999, vol. 14, no. 3, pp. 126–129. <https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
10. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 90–97. <https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear Journal*. 2008, vol. 265, no. 5–6, pp. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Lugovaya V.A., Yaroshik V.V. Hardfacing of composite alloys at hardening of working surfaces of rotation bodies. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015, no. 40 (59), pp. 166–173. (In Russ.).
13. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of cost effectively alloy for restoration of hammer mill bits. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
14. Eremin A.E., Eremin E.N., Filippov Yu.O., Matalasova A.E., Kats V.S. Structure and properties of high-chromium metal of shut-off valves deposited with mass-produced welding wires. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2014, no. 1 (127), pp. 55–58. (In Russ.).
15. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of Fe–C–Cr–Mn–Si system additionally alloyed with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011, no. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
16. Gusev A.I., Romanov D.A., Kozyrev N.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Structure of weld of wear resistant hardfacing with a flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2021, no. 2 (36), pp. 3–11. (In Russ.).
17. Vostretsov G.N., Bich T.A., Bashchenko L.P. Flux-cored wire for plasma hardfacing of rolling rolls in nitrogen medium. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2014, no. 3 (9), pp. 36–40. (In Russ.).

18. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 4 (22). С. 21–24.
19. Пат. 2641590 РФ. МПК8 B23 K35/36 B 23 K35/36. Порошковая проволока / Козырев Н.А., Гусев А.И., Галевский Г.В., Крюков Р.Е., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Козырева О.А.; Заявл. 22.06.2016. Опубл. 18.01.2018.
20. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Осетковский И.В. Исследование свойств порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co для упрочнения узлов и деталей оборудования горнорудной и угледобывающей отраслей // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 135–140.
18. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I., Kryukov R.E., Popova M.V. Wear resistance of metal deposited with flux-cored wires of Fe–C–Si–Mn–Ni–Mo–V and Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V systems. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2017, no. 4 (22), pp. 21–24. (In Russ.).
19. Kozyrev N.A., Gusev A.I., Galevskii G.V., Kryukov R.E., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Kozyreva O.A. *Flux-cored wire*. Patent RF no. 2641590. МПК8 B23 K35/36 B 23 K35/36. *Bulleten' izobretenii*. 2018, no. 2. (In Russ.).
20. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Osetkovskii I.V. Properties of flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co system for hardening of nodes and parts of equipment of mining and coal mining industries. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017, no. 3, pp. 135–140. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Александр Александрович Усольцев, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-6220-7910

E-mail: a.us@rambler.ru

Александр Игоревич Гусев, соискатель степени к.т.н. кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ALLXX8ALLXX85@mail.ru

Алексей Романович Михно, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Aleksandr A. Usol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-6220-7910

E-mail: a.us@rambler.ru

Aleksandr I. Gusev, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

E-mail: ALLXX8ALLXX85@mail.ru

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. А. Козырев – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований.

А. А. Усольцев – разработка плана исследований, организация испытаний образцов, сбор данных исследований, анализ результатов исследований.

А. И. Гусев – выполнение металлографических исследований, анализ результатов исследований.

А. Р. Михно – исследование образцов на электронном микроскопе, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

В. Е. Громов – формирование основной идеи исследований, разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.

N. A. Kozyrev – formation of the research main idea, development of the work methodology, analysis of the research results.

A. A. Usol'tsev – development of the research plan, organization of samples testing, collection of the research data, analysis of the research results.

A. I. Gusev – implementation of metallographic studies, analysis of the research results.

A. R. Mikhno – examination of the samples on electron microscope, analysis of the research results, preparation of materials for the article.

V. E. Gromov – formation of the research main idea, development of the research plan, formulation of objectives, analysis of the research results.

Поступила в редакцию 23.10.2021

После доработки 16.11.2021

Принята к публикации 24.11.2021

Received 23.10.2021

Revised 16.11.2021

Accepted 24.11.2021