

УДК 621.791.72

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НАПЛАВКОЙ*

Райков С.В., к.т.н., доцент кафедры физики им. В.М. Финкеля

Коновалов С.В., д.т.н., профессор кафедры физики им. В.М. Финкеля

Капралов Е.В., аспирант кафедры физики им. В.М. Финкеля

Будовских Е.А., д.т.н., профессор кафедры физики

им. В.М. Финкеля (budovskih_ea@physics.sibsiu.ru)

Целлермаер В.Я., д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения,
водоотведения и вентиляции

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

Аннотация. Защитное покрытие на низколегированной стали Hardox 400 наплавляли с использованием порошковой проволоки SK A 70-G электродуговым методом. Такие покрытия эффективно работают в условиях сильного абразивного изнашивания и ударных нагрузок и применяются в различных областях промышленности. Методами сканирующей электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом и рентгеновского фазового анализа изучен химический и фазовый составы, а также состояние дефектной субструктуры покрытия. По морфологическому признаку в покрытиях выделяются три слоя. Поверхностный слой толщиной 3,5 мм имеет преимущественно структуру ячеистой кристаллизации и характеризуется присутствием остроконечных частиц, обогащенных ниобием. Промежуточный слой (до 0,4 мм) имеет структуру островкового типа. Переходный слой (до 0,02 мм), непосредственно примыкающий к границе раздела с подложкой, характеризуется столбчатой и дендритной структурой. Зона термического влияния имеет общую толщину 4 мм. Установлено, что износостойкость покрытий в 2,3 раза выше, чем у подложки. Это обусловлено формированием субмикроразмерной структуры кристаллизации, выделением большого количества высокопрочных частиц упрочняющих фаз, а также формированием мартенситной структуры α -фазы покрытия. Упрочняющими фазами являются Fe_3C , объемная доля которого составляет 10 %, карбиды ниобия и хрома состава NbC и Cr_3C_2 , суммарная объемная доля которых 20 %, и борид железа состава Fe_3B , объемная доля которого 10 %.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, низколегированная сталь, износостойкость, структура кристаллизации, химический состав, фазовый состав, карбиды, бориды.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-769-774

В последние годы получили развитие исследования в области наплавки [1 – 3] композиционных покрытий, упрочненных мелкодисперсными частицами карбидов, боридов и других высокотвердых и высокомодульных фаз [4 – 10]. Такие покрытия эффективно работают в условиях сильного абразивного изнашивания и применяются в различных областях промышленности. Основным фактором, определяющим их эксплуатационные свойства, являются химический и фазовый составы материала покрытия. Для обоснованного выбора материалов покрытий, соответствующих условиям их эксплуатации, необходимо проведение подробных исследований их свойств и структуры.

Цель настоящей работы – анализ химического и фазового составов, состояния дефектной субструктуры и

трибологических характеристик защитных покрытий, сформированных на низкоуглеродистой слаболегированной стали методом электродуговой наплавки порошковой проволокой.

В качестве подложки использовали низколегированную сталь Hardox 400 фирмы SSAB (Швеция) мартенситного класса (табл. 1), которая широко применяется в горнодобывающей и дорожно-строительной отраслях. Покрытия толщиной 4 – 5 мм наплавляли электродуговым методом порошковой проволокой SK A 70-G фирмы Судокей (Бельгия) (табл. 1). В последние годы наблюдается рост применения порошковых проволок в различных отраслях промышленности, что связано, в частности, с высокой производительностью процесса сварки и наплавки с их использованием [11].

Фактор износа как объем вытираемого материала покрытия, рассчитанный на единицу нормальной нагрузки и пути трения [12], определяли с использованием триботестера Tribotechnic. В качестве контртела использовали шарик из твердого сплава ВК8 диам. 3 мм, шарик перемещался по поверхности образца вдоль

* Исследование выполнено при финансовой поддержке госзаданий Минобрнауки № 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4166.2015.2 и докторов наук МД-2920.2015.8, РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-12009 офи_м, 15-08-03411, 14-08-00506а.

Таблица 1

Химический состав материалов

Table 1. Chemical composition of the materials

Материал	Содержание, % (по массе), элементов*									
	C	Si	Mn	P	N	B	S	Mo	Cr	Nb
Сталь Hardox 400	0,18	0,70	1,60	0,01	0,004	0,025	0,01	0,25	–	–
SK A 70-G	2,60	0,60	1,70	–	–	2,2	–	–	14,8	4,7

Примечание. Остальное – железо.

окружности диам. 4 мм с линейной скоростью 2 см/с при нормальной нагрузке 5 Н. Число оборотов контртела составило 5000.

Исследования химического и фазового составов, состояния дефектной субструктуры наплавленного покрытия осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) и рентгеновского фазового анализа (рентгеновский дифрактометр ДРОН-7). Для травления наплавки использовали 3 %-ый спиртовой раствор азотной кислоты.

Трибологические испытания показали, что фактор износа покрытия составил $3,5 \cdot 10^7 \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, что в 2,3 раза выше, чем у подложки.

Структура покрытия приведена на рис. 1. Обращает на себя внимание присутствие в нем большого количества включений ограненной формы (рис. 1, а, б).

Размеры включений изменяются в пределах от 1 до 5 мкм. Вторым морфологическим элементом покрытия являются структуры дендритной (рис. 1, б, в) и ячеистой (рис. 1, в, г) кристаллизации. Размеры ячеек изменяются в пределах от 0,3 до 0,8 мкм. Толщина прослоек, которые разделяют ячейки, составляет 50 – 100 нм.

Микрорентгеноспектральный анализ участков покрытия (обозначенных на рис. 1 рамками) показал, что частицы ограненной формы обогащены атомами ниобия (рис. 1, б, область 1); области дендритной кристаллизации (рис. 1, в, область 2) обогащены атомами железа, хрома и углерода. Особенностью структуры ячеистой кристаллизации, также сформированной преимущественно атомами железа, является наличие большой концентрации атомов углерода и хрома (рис. 1, в, область 3). В количественном отношении эти результаты приведены в табл. 2.

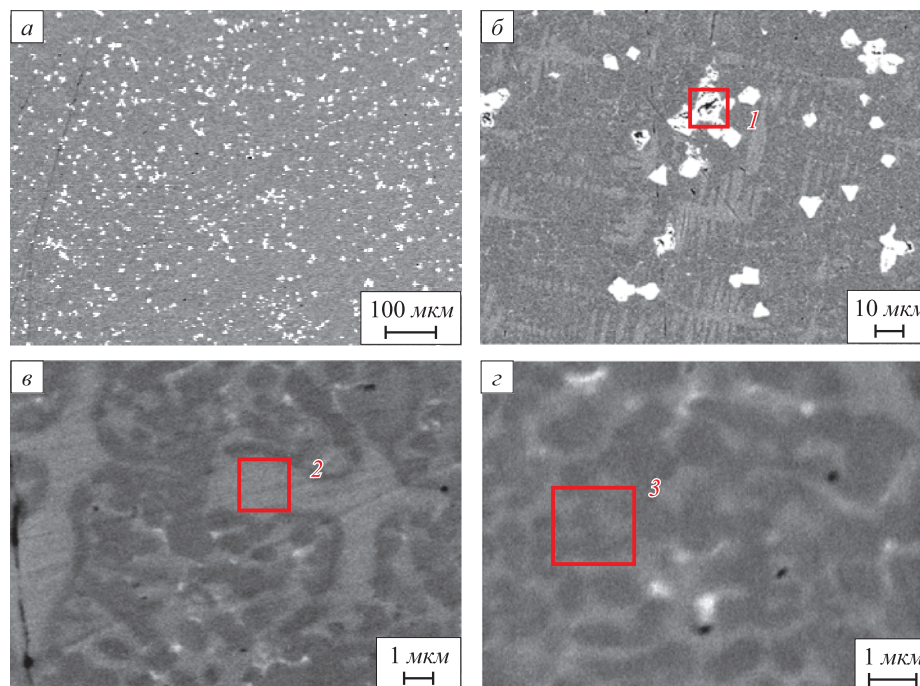


Рис. 1. Характерная структура наплавки, формирующейся на поверхности стали в сечении, параллельном поверхности наплавки (рамками выделены участки микрорентгеноспектрального анализа материала)

Fig. 1. Characteristic welding structure, formed on the surface of steel in the section, which is parallel to the welding surface (the frames show the sections of microx-ray spectral analysis)

**Результаты микрорентгеноспектрального анализа структуры наплавки,
сформированной на поверхности стали**

Table 2. Results of microroentgenospectral analysis of welding structure, formed on the surface of steel

Область	Содержание, % (по массе), легирующих элементов							Итог
	C	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Nb	
1	0	0	1,02	6,50	0	7,07	85,42	100,00
2	3,74	1,40	0	7,89	1,44	85,53	0	100,00
3	4,11	0,71	0	13,07	1,71	80,40	0	100,00

Рентгеновский фазовый анализ показал (рис. 2), что основной фазой покрытия является α -железо, средний размер D областей когерентного рассеяния которого составляет 30 нм. Микроискажения кристаллической решетки $\Delta d/d = 0,0010 \pm 0,0005$. Параметр кристаллической решетки α -железа $a = 0,28740 \pm 0,00010$ нм несколько выше, чем у α -железа, не содержащего примеси ($a_0 = 0,28668$ нм [13]). Это вызвано формированием пересыщенного атомами углерода твердого раствора, поэтому такая структура относится к структуре закалочного типа, то есть является мартенситом.

Предполагая, что увеличение параметра кристаллической решетки α -фазы покрытия вызвано формированием пересыщенного твердого раствора при использовании оценочного выражения, приведенного в работах [14, 15], $\Delta C = \frac{a - a_0}{39 \pm 4} 10^3$ (где ΔC – концентрация углерода, расположенного в кристаллической решетке на основе α -железа), можно показать, что $\Delta C = 0,018$ % (по массе).

Упрочняющими фазами сформированного покрытия являются карбид железа состава Fe_3C (цементит), объемная доля которого составляет 10 %, карбиды ниобия и хрома состава NbC и Cr_3C_2 , суммарная объемная

доля которых 20 %, и борид железа состава Fe_3B , объемная доля которого 10 % (табл. 3). Следует отметить, что эти фазы являются ожидаемыми, так как в состав порошковой проволоки кроме железа в сравнительно большом количестве входят углерод, бор, ниобий и хром (табл. 1).

Анализ поперечного сечения системы покрытие–подложка позволил выявить многослойную структуру, которую по морфологическому признаку можно представить поверхностным (рис. 3, а, слой 1), промежуточным и переходным слоями (рис. 3, а, слои 2 и 3 соответственно), а также зоной термического влияния стали (рис. 3, слой 4). Поверхностный слой имеет преимущественно структуру ячеистой кристаллизации и характеризуется присутствием частиц, обогащенных ниобием (рис. 3, а, б). Размеры ячеек кристаллизации изменяются в пределах от 0,5 до 1,0 мкм; толщина прослоек, их разделяющих, составляет 0,1–0,3 мкм. Промежуточный слой (рис. 3, слой 2) имеет структуру островкового типа. Островки размерами 5–10 мкм разделены протяженными прослойками, имеющими сложную субструктуру, размеры элементов которой изменяются в пределах 0,3–0,6 мкм (рис. 3, в). Переходный слой, непосредственно примыкающий к границе

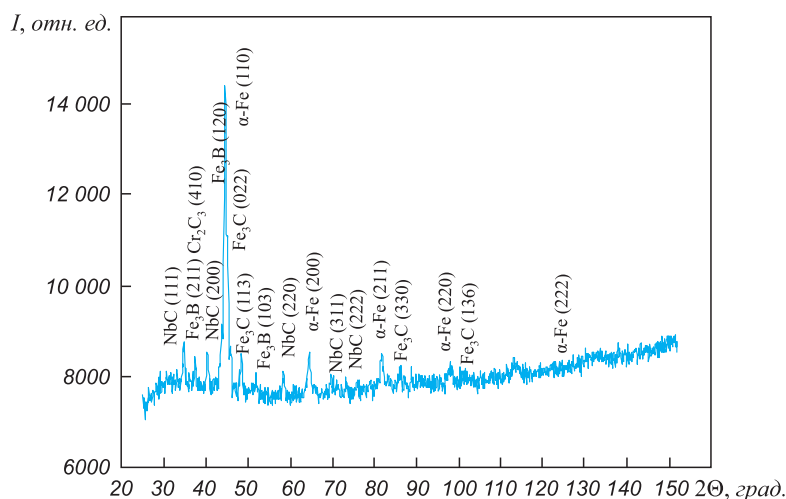


Рис. 2. Участок рентгенограммы, полученной с поверхностного слоя наплавки

Fig. 2. Section of X-ray pattern, obtained from the surface welding layer

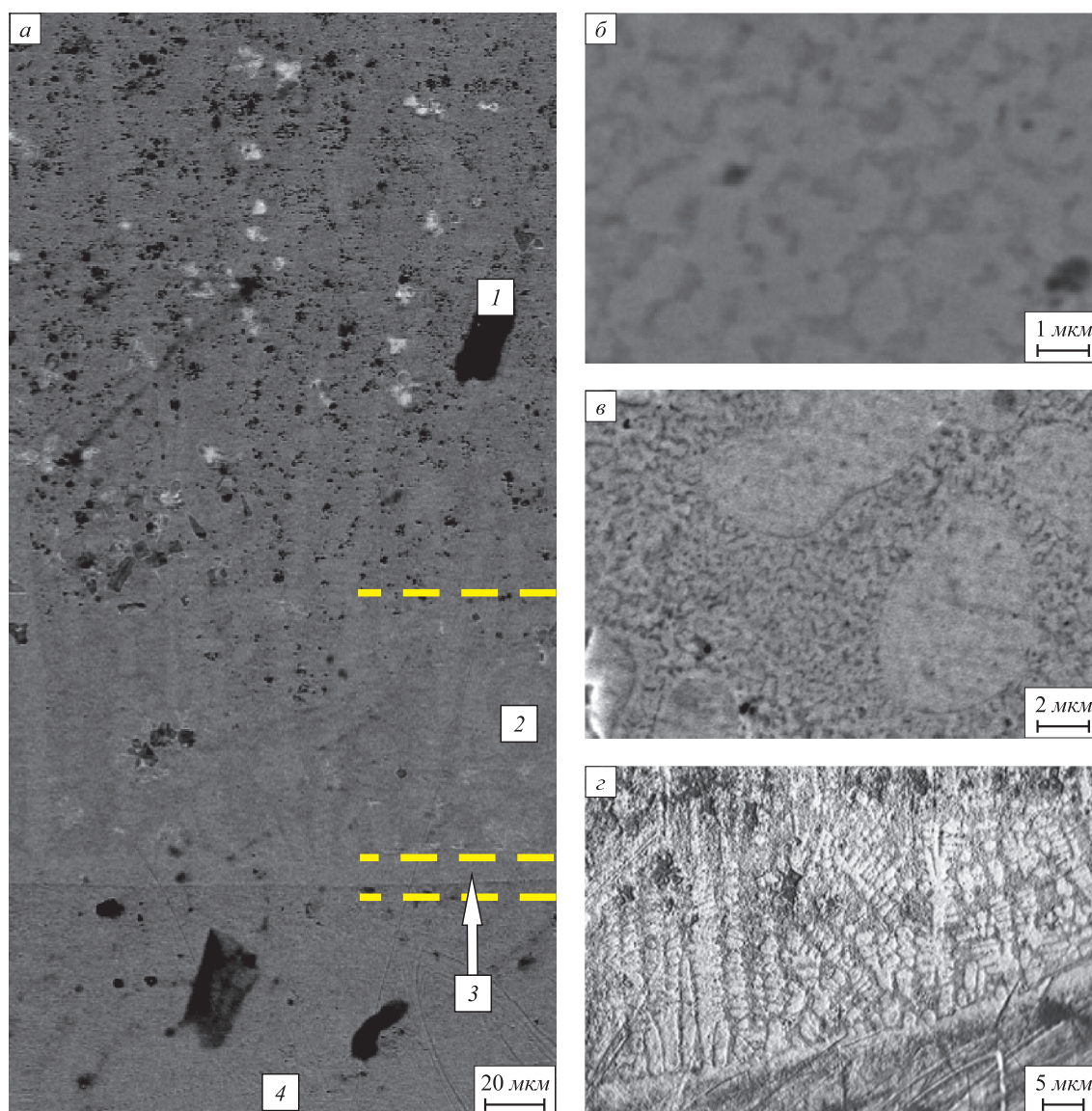


Рис. 3. Структура (а) поперечного шлифа наплавки, сформированной на стали, и структура областей 1, 2 и 3 (б, в и г): 1 – слой наплавки; 2, 3 – переходные слои; 4 – слой термического влияния стали

Fig. 3. Structure (a) of cross thin welding section, formed on steel, the structure of zones 1, 2 and 3 (б, в and г): 1 – welding layer; 2, 3 – transition layers; 4 – heat-affected layer of steel

раздела с подложкой, сравнительно тонок (10 – 20 мкм) и характеризуется столбчатой дендритной структурой, формирующейся от границы раздела (рис. 3, г).

Структура покрытия характеризуется наличием микротрещин и микропор (рис. 4). Трещины выявлены во всех слоях покрытия, наиболее протяженные из них располагаются в слое 1 и располагаются преимущественно параллельно поверхности покрытия (рис. 4, а). Источниками трещин являются крупные (1 – 2 мкм) включения частиц второй фазы (рис. 4, б), дендриты кристаллизации (рис. 4, в), области островковой кристаллизации (рис. 4, г).

Таким образом, высокая износостойкость покрытий обусловлена формированием в них субмикроразмерной структуры кристаллизации, выделением большого (около 40 %) количества высокопрочных частиц упроч-

няющих фаз, а также формированием мартенситной структуры основы покрытия.

Выводы. Покрытия, наплавленные на поверхность низкоуглеродистой слаболегированной стали Hardox 400, имеют износостойкость в 2,3 раза выше, чем подложка. Покрытия состоят из трех слоев, которые различаются морфологией элементов субструктуры. Покрытия сформированы многофазным материалом и представлены зернами твердого раствора на основе α -железа, частицами карбида железа состава Fe_3C (цементит), объемная доля которых 10 %, карбидов ниобия и хрома состава NbC и Cr_3C_2 (суммарная объемная доля карбидов 20 %) и боридов железа состава Fe_3B , объемная доля которых 10 %. Выявлено, что повышенная износостойкость покрытий обусловлена формированием субмикрокристаллической мартенситной структуры

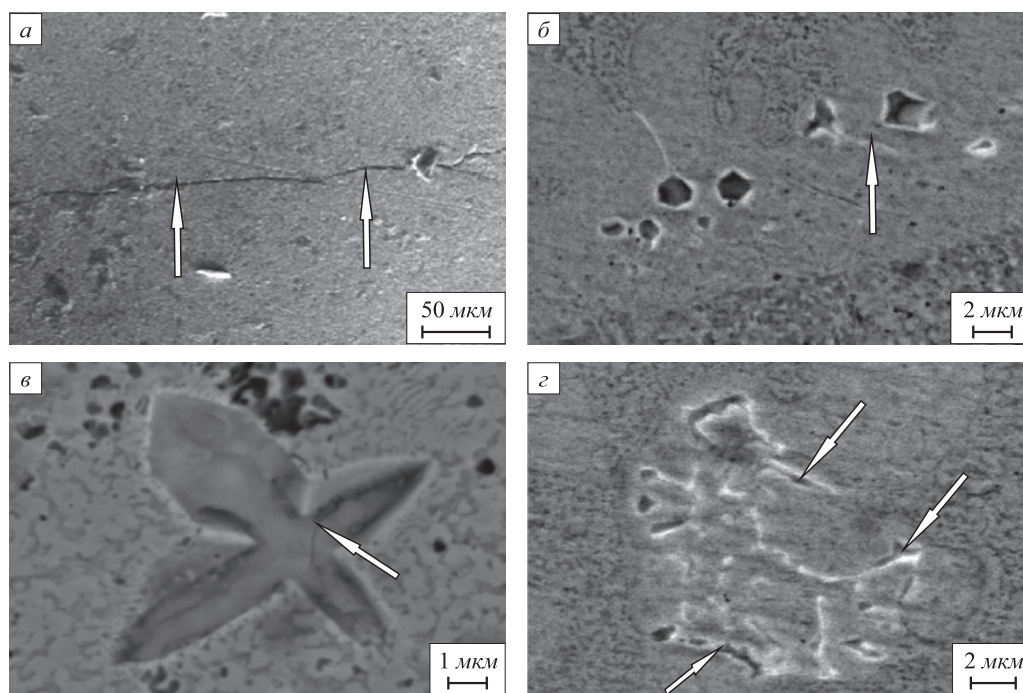


Рис. 4. Дефекты структуры (трещины указаны стрелками), присутствующие в сформированной на стали наплавке

Fig. 4. Structure defects (the cracks are shown by the pointers), presented in the formed welding on steel

α -фазы и выделением на стадии кристаллизации большого (примерно 40 %) объема высокопрочных частиц карбидных и боридной фаз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
2. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 160 с.
3. Рябцев И.А., Сенченко И.К. Теория и практика наплавочных работ. – Киев: Екотехнологія, 2013. – 400 с.
4. Вайнерман А.Е., Беляев Н.В. Аргодуговая наплавка порошков на основе карбида вольфрама на сталь для получения износостойких покрытий // Вопросы материаловедения. 2002. № 2. С. 43 – 46.
5. Коберник Н.В., Чернышов Г.Г., Михеев Р.С., Чернышова Т.А., Кобелева Л.И. Аргодуговая наплавка износостойких композиционных покрытий // Физика и химия обраб. материалов. 2009. № 1. С. 51 – 55.
6. Соколов Г.Н., Лысак И.В., Трошков А.С., Зорин И.В., Горемыкина С.С., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама // Физика и химия обраб. материалов. 2009. № 6. С. 41 – 47.
7. Рябцев И.А., Панфилова А.И., Бабинцев А.А., Рябцев И.И., Горданы Г.Н., Бабийчук И.Л. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла карбидами различных типов // Автомат. сварка. 2015. № 5-6 (742). С. 84 – 88.
8. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Костерев В.Б. Повышение износостойкости стали наплавкой // Сталь. 2014. № 7. С. 86 – 88.
9. Raikov S.V., Kapralov E.V., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Structure Gradient in Wear-Resistant Coating on Steel // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 2. P. 120 – 124.
10. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой // Изв. вуз. Физика. 2015. Т. 58. № 4. С. 39 – 45.
11. Мазур А.А., Маковецкая О.К., Пустовойт С.В., Бровченко Н.С. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов // Автомат. сварка. 2015. № 5-6 (742). С. 68 – 74.
12. Вершинин Д.С., Смолякова М.Ю., Манохин С.С., Дручинина О.А., Ахмадеев Ю.Х. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава VT16 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 12. С. 45 – 49.
13. Физические величины. Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
14. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
15. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon // Trans. Met. Soc. AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1818 – 1820.

Поступила 31 июля 2013 г.

FORMATION OF WEAR-RESISTANT WELD SURFACE LAYERS

S.V. Raikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

S.V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

E.V. Kapralov, Postgraduate of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

E.A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

(budovskikh_ea@physics.sibsiu.ru)

V.Ya. Tsellermaer, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Heat-gas-water Supply, Water Disposal and Ventilation

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The protective coating on low-alloy steels Hardox 400 has been welded by electric arc method using the flux cored wire SK A 70-G. Such coating works effectively in conditions of strong abrasive wear and shock loads and is used in various industries. Chemical and phase composition and defect substructure condition of the coatings has been investigated using scanning electron microscopy with EDA-technique and x-ray phase analysis. The coatings can be divided in three layers by morphological features. The surface layer with the thickness of 3.5 mm has the property cellular structure crystallization and can be characterized by the presence of faceted particles enriched in niobium. The intermediate layer (0.4 mm) has the structure of an islet type. Transition layer (to 0.02 mm) adjacent to the interface with the substrate, is characterized by columnar and dendritic structure. Heat-affected zone has a total thickness of 4 mm. It has been established that the wear resistance of the coatings is in 2.3 times higher than of the substrate. This is due to the formation of the submicrodimensional structure of crystallization, the release of large amounts of high strength particles of hardening phases and forming a martensitic structure of the α -phase of the coating. The reinforcing phases are Fe_3C , the volume fraction of which is 10 %, the carbides of niobium and chromium NbC and Cr_3C_2 , with total volume fraction of 20 %, and iron boride Fe_3B , with volume fraction of 10 %.

Keywords: surfacing, flux-cored wire, low-alloy steel, wear resistance, structure of crystallization, chemical composition, phase composition, carbides, borides.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-769-774

REFERENCES

- Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyanskii P.A. *Plazmennye tekhnologii. Svarka, nanesenie pokrytii, uprochnenie* [Plasma technologies. Welding, coating, hardening]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 406 p. (In Russ.).
- Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Welding of machine components and mechanisms]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007. 160 p. (In Russ.).
- Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. *Teoriya i praktika naplavochnykh rabot* [Theory and practice of welding works]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2013. 400 p. (In Russ.).
- Vainerman A.E., Belyaev N.V. Argon-arc welding of powder based on tungsten carbide on steel for obtaining wear-resistant coatings. *Voprosy materialovedeniya*. 2002, no. 2, pp. 43–46. (In Russ.).
- Kobernik N.V., Chernyshov G.G., Mikheev R.S., Chernyshova T.A., Kobeleva L.I. Argon-arc welding of wear-resistant composition coatings. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2009, no. 1, pp. 51–55. (In Russ.).
- Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Tsvetkov Yu.V. Structure modification of welded metal with nano-disperse tungsten carbides. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2009, no. 6, pp. 41–47. (In Russ.).
- Ryabtsev I.A., Panfilova A.I., Babinets A.A., Ryabtsev I.I., Gordan' G.N., Babiichuk I.L. Structure and wear resistance at abrasive wear of welded metal with carbides of different types. *Avtomaticheskaya svarka*. 2015, no. 5-6 (742), pp. 84–88. (In Russ.).
- Kapralov E.V., Raikov S.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Kosterev V.B. Increase of steel wear resistance with welding. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 86–88. (In Russ.).
- Raikov S.V., Kapralov E.V., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Structure Gradient in Wear-Resistant Coating on Steel. *Steel in Translation*. 2015, Vol. 45, no. 2, pp. 120–124.
- Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Nano-structural states and properties of the surfacing formed on steel by a cored wire. *Russian Physics Journal*. 2015, August, 7 p.
- Mazur A.A., Makovetskaya O.K., Pustovoi S.V., Brovchenko N.S. Flux cored wires in the world and regional markets of welding materials. *Avtomaticheskaya svarka*. 2015, no. 5-6 (742), pp. 68–74. (In Russ.).
- Vershinin D.S., Smolyakova M.Yu., Manokhin S.S., Druchinina O.A., Akhmadeev Yu.Kh. Studies of tribological properties of nitrated titanium alloy VT16. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2010, Vol. 76, no. 12, pp. 45–49. (In Russ.).
- Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. etc. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Reference book]. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z. eds. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (In Russ.).
- Kurdyumov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977. 236 p. (In Russ.).
- Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967, Vol. 239, no. 11, pp. 1818–1820.

Acknowledgements. The research was performed with the financial support of state tasks of the Ministry of education and science no. 2708 and 3.1496.2014/K for the implementation of the research work, grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists, Candidates of Sciences MK-4166.2015.2 and Doctors of Sciences МД-2920.2015.8, RFBR in the frames of scientific projects no. 13-02-12009 офн_м, 15-08-03411, 14-08-00506a.

Received July 31, 2013