

УДК 669.04

СТРОЕНИЕ ПО ГЛУБИНЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ НА СТАЛИ*

Райков С.В.¹, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры физики

Капралов Е.В.¹, аспирант

Иванов Ю.Ф.^{2,3}, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник

Будовских Е.А.¹, д.т.н., профессор кафедры физики

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики (gromov@physics.sibsiu.ru)

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

² Институт сильноточной электроники СО РАН
(634036, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(634036, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

Аннотация. Методами сканирующей электронной микроскопии показано, что формирование наплавки на поверхности стали сопровождается созданием многослойной структуры, включающей слой наплавки, переходный слой и слой зоны термического влияния. Кристаллизация наплавки сопровождается формированием столбчатой структуры, которая представлена чередующимися слоями двух типов толщиной 8 – 10 мкм. Слои первого типа характеризуются пластинчатой структурой, ориентированной перпендикулярно поверхности подложки, толщина разделяющих пластинок и прослоек в слое изменяется в пределах 50 – 100 нм. Слои второго типа имеют структуру пластинчатого и глобулярного типа. По мере удаления от поверхности наплавки пластинчатая структура слоев первого типа вырождается и на границе с переходным слоем полностью исчезает. Размеры глобул изменяются в пределах 1,5 – 3,0 мкм, глобулы фрагментированы. Градиентный характер структуры выявлен также в переходном слое и в зоне термического влияния. Установлено, что граница раздела наплавка – сталь находится в упруго-напряженном состоянии, сформированном вследствие сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения; на это указывает наличие микропор и микротрещин, расположенных строчками, протяженных прослоек второй фазы.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, порошковая проволока, структурно-фазовые состояния, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения.

В последние годы получил развитие подход к упрочнению металлов и сплавов с использованием концентрированных потоков энергии. Среди них выделяют электродуговую наплавку [1 – 5], электровзрывное напыление [6], электронно-пучковую обработку [7]. Эффективным методом увеличения срока эксплуатации деталей и механизмов является формирование на поверхностях, которые работают в тяжелых условиях, покрытий, наносимых электродуговым способом с использованием порошковых электродов [1 – 5]. За счет содержащихся в порошковой проволоке легирующих элементов обеспечивается надежная защита расплавленного металла от воздействия воздуха и высокие механические свойства покрытий. Электродуговые износостойкие покрытия, наплавляемые порошковой проволокой, как и многие другие покрытия и слои подобного типа, формируются в условиях, весьма далеких от равновесных и, следовательно, обладают градиентной структурой. Градиентными считаются структуры, в которых вдоль некоторых направлений изменяются

один или несколько параметров. Такими параметрами могут быть характеристики физико-механических свойств (микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д.), размер структурных элементов (размеры зерен, дислокационной субструктуры, частиц второй фазы), характеристики структуры (параметры кристаллической решетки фаз, плотность дислокаций, амплитуда внутренних полей напряжений, степень разориентации элементов субструктуры), характеристики фазового состава (объемная доля продуктов полиморфного превращения и частиц вторых фаз) [7].

Цель настоящей работы – анализ степени градиентности структуры наплавки, формируемой на низкоуглеродистой слаболегированной стали электродуговым методом.

В качестве материала исследования использовали сталь Hardox 400, элементный состав которой приведен в таблице. На поверхности стали электродуговым методом формировали толстые (до 5 мм) покрытия. Наплавку покрытия осуществляли порошковой проволокой марки EnDotec DO-30 diam. 1,6 мм. Твердость слоев наплавки (согласно спецификации проволоки) составляет 67 HRC. Наплавку проводили в среде за-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м, госзадания Минобрнауки 2708ГЗ и проекта ФНИ СО РАН (проект № П.9.5.2).

Химический состав материалов исследования

Материал	Содержание*, % (по массе)								
	C	Si	Mn	P	N	B	S	Mo	Ni
Сталь Hardox 400	0,18	0,70	1,60	0,01	0,004	0,025	0,01	0,25	–
Сварочная проволока EnDOTec DO-30	0,50	0,40	1,40	0,02	–	3,700	–	–	0,01

Примечание. Остальное – железо.

щитного газа состава 82 % Ar – 18 % CO₂ при сварочном токе 250 – 300 А и напряжении на дуге 30 – 35 В. Элементный состав сварочной проволоки, использованной для формирования покрытия, приведен в таблице.

Исследование градиентного состояния покрытия осуществляли методами оптической (микровизор металлографический μ Vizo-MET-221) и сканирующей (сканирующий электронный микроскоп Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) микроскопии [8, 9]. Анализировали состояние структуры покрытия в продольных и поперечных сечениях.

Выполненные исследования показали, что в сечении, параллельном поверхности подложки, наплавка имеет островковое строение (рис. 1). Острова размерами 15 – 20 мкм разделены прослойками толщиной 3 – 5 мкм. Острова и разделяющие прослойки структурированы. Размеры областей субструктуры островков изменяются в пределах 0,25 – 0,50 мкм, прослойки 1,5 – 2,5 мкм (рис. 1, в, з). Материал наплавки явля-

ется пористым. Размеры пор изменяются в пределах 0,3 – 1,5 мкм (рис. 1, в, поры показаны стрелками). Количество микропор на единицу площади поверхности наплавки составляет $3,1 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$.

Анализ поперечного шлифа наплавки позволил выявить многослойную структуру, представленную собственно слоем наплавки (рис. 2, а, слой 1), переходным слоем (рис. 2, б, слой 2) и слоем термического преобразования стали (рис. 2, б, слой 3).

Детальный анализ структуры поперечного сечения наплавки осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии. Характерные изображения морфологических составляющих приведены на рис. 3 и 4. Можно отметить, что кристаллизация собственно наплавки сопровождается формированием столбчатой структуры (рис. 2, а; рис. 4, а – в). Столбчатая структура ориентирована практически перпендикулярно поверхности наплавки (поверхности образца стали) (рис. 2, а; рис. 4, а). Столбчатая структура представлена чередующимися слоями толщиной 8 – 10 мкм, слой

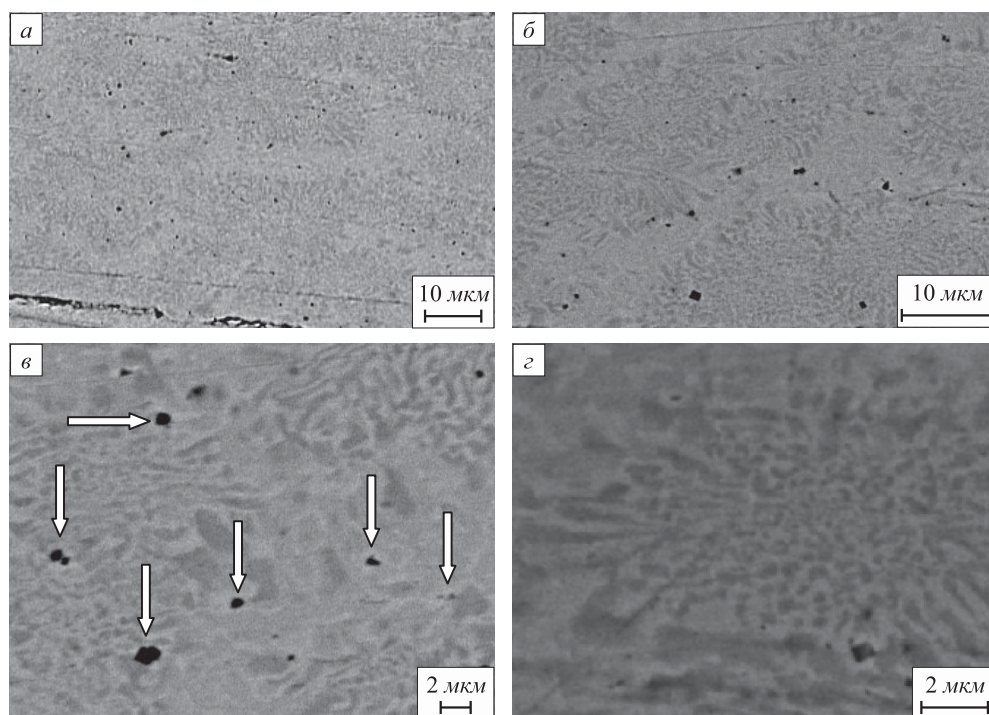


Рис. 1. Строение наплавки, выявляемое в сечении, параллельном поверхности подложки (а, б), и субструктура наплавки, включающая островки и прослойки (в, з) (сканирующая электронная микроскопия, стрелками показаны микропоры)

Fig. 1. Structure of facing revealed in the cross-section, parallel to substrate surface (а, б), and the substructure of facing, including islands and layers (в, з) (scanning electron microscopy, the arrows show the micropores)

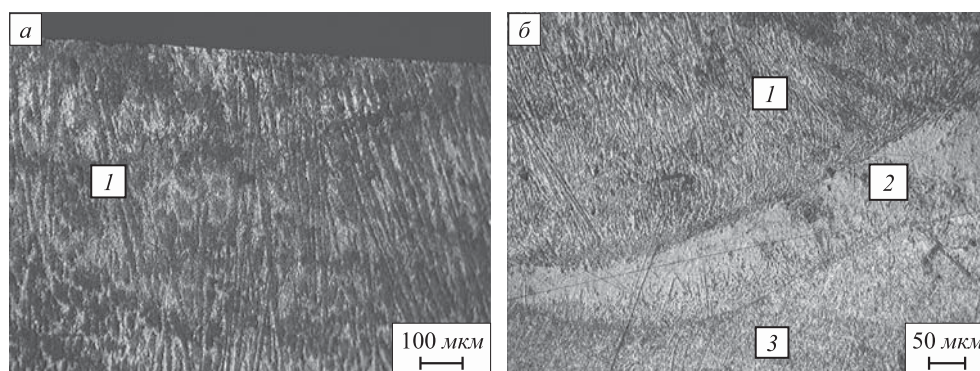


Рис. 2. Структура поперечного сечения травленого шлифа стали с наплавкой (оптическая микроскопия):
1 – слой наплавки (а, б); 2 – переходный слой (б); 3 – зона термического влияния (б)

Fig. 2. Structure of cross section of etched steel slice with facing (optical microscopy):
1 – layer of facing (а, б); 2 – transition layer (б); 3 – heat-affected zone (б)

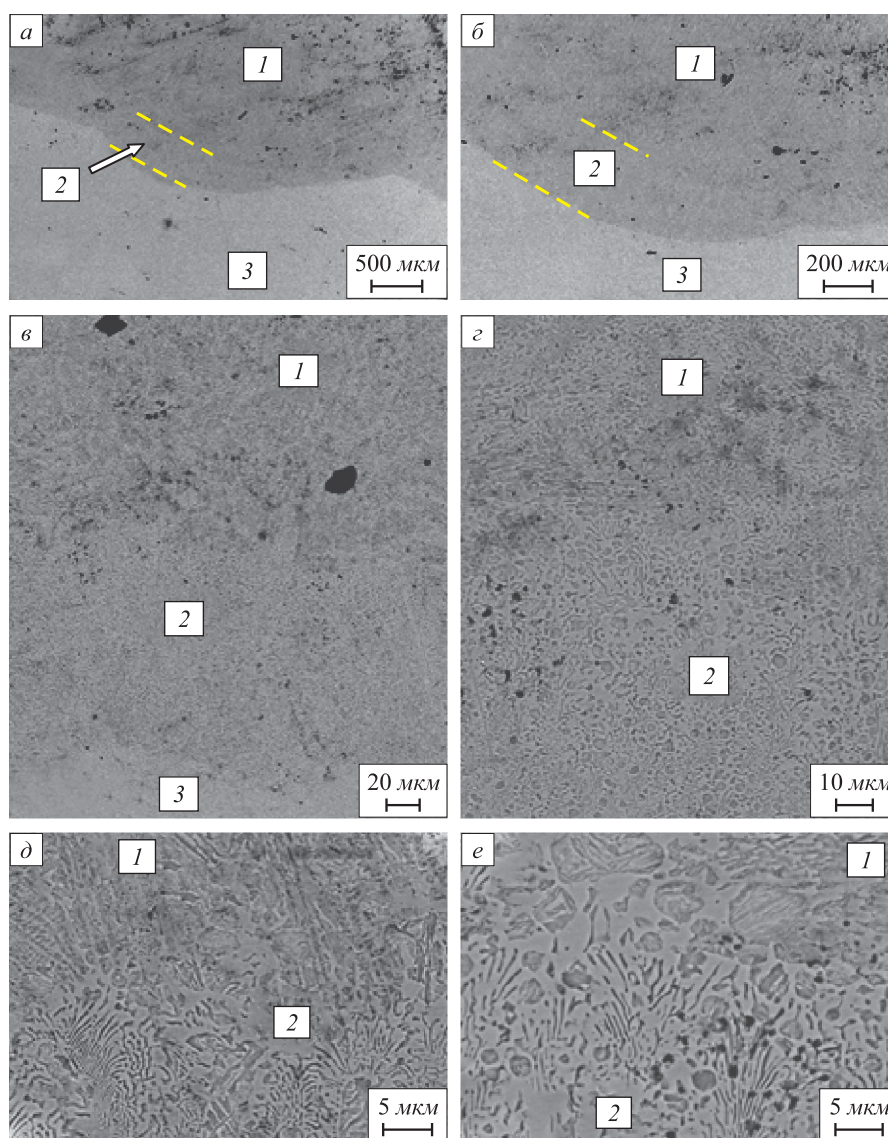


Рис. 3. Структура поперечного шлифа наплавки, сформированной на стали, при различных увеличениях (сканирующая электронная микроскопия):
1 – слой наплавки; 2 – переходный слой; 3 – слой термического влияния стали

Fig. 3. Structure of cross slice of facing, formed on the steel at different increases (scanning electron microscopy):
1 – layer of facing; 2 – transition layer; 3 – layer of heat affection

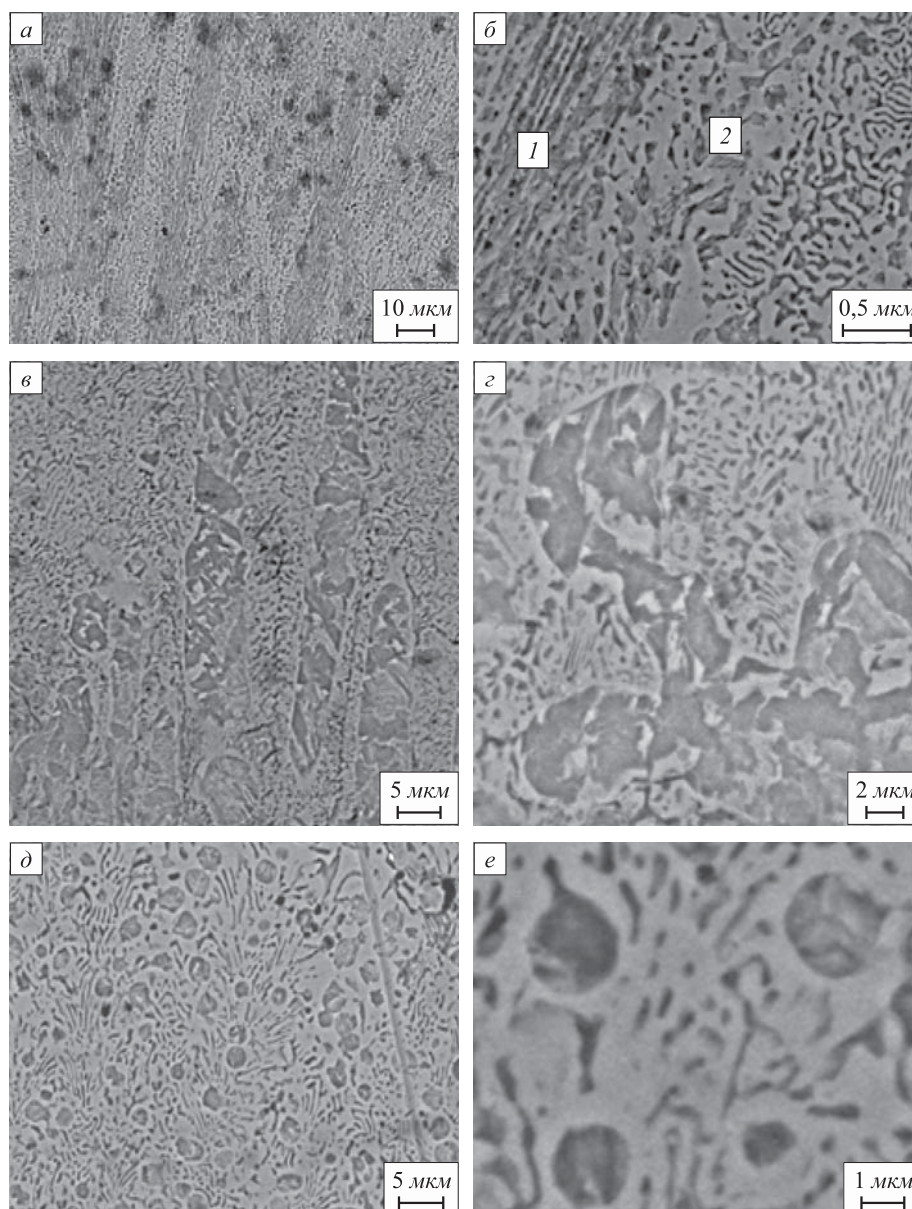


Рис. 4. Морфологические типы структуры наплавки, сформированной на стали:
a – столбчатая структура, *б* и *в* – пластинчатая структура первого (*б*) и второго (*в*) типов; *г* – *е* – глобулярный тип структуры
 (сканирующая электронная микроскопия)

Fig. 4. Morphological types of facing structure, formed on steel:
a – columnar structure, *б* and *в* – plate-like structure of the first (*б*) and second (*в*) types; *г* – *е* – globular type of structure
 (scanning electron microscopy)

отличаются типом субструктуры и, соответственно, контрастом травления (рис. 4, *б*) (слои первого и второго типов).

Слои первого типа (рис. 4, *б*, слой 1) характеризуются пластинчатой структурой, ориентированной перпендикулярно поверхности подложки. Толщина пластинок и прослоек, их разделяющих, изменяется в пределах 50 – 100 нм. Слои второго типа (рис. 4, *б*, слой 2) имеют структуру пластинчатого и глобулярного типов. По мере удаления от поверхности наплавки пластинчатая структура слоев первого типа вырождается (рис. 3, *в*; рис. 4, *в*) и на границе с переходным слоем

полностью исчезает (рис. 4, *г*). Особенностью строения переходного слоя является глобулярный тип структуры (рис. 4, *д*, *е*). Размеры глобул изменяются в пределах 1,5 – 3,0 мкм. Глобулы фрагментированы, то есть разбиты на некоторое количество слабоориентированных областей (рис. 4, *е*).

Важным фактором, существенным образом влияющим на работоспособность детали с наплавленным на нее слоем, является состояние границы раздела материала наплавки и поверхности детали. Результаты исследования (рис. 5) позволяют заключить, что граница раздела исследуемой системы наплавка – сталь

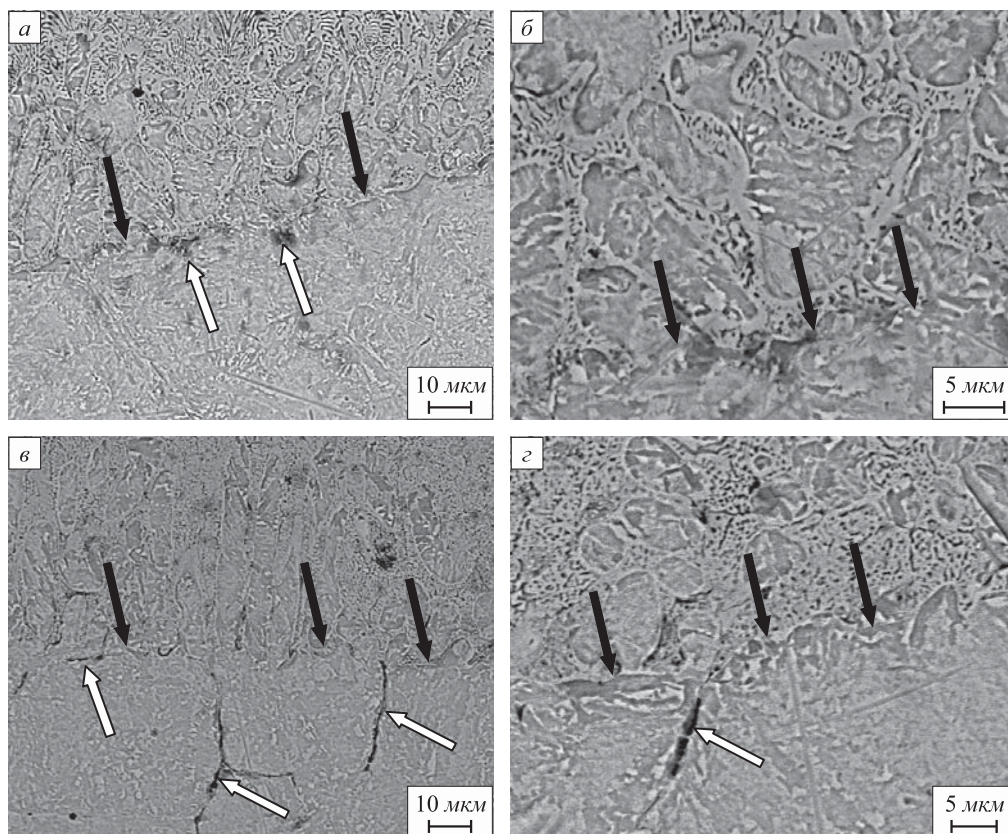


Рис. 5. Структура материала, прилегающего к границе раздела наплавка – сталь (темными стрелками указана граница, светлыми – дефекты структуры материала)

Fig. 5. Material structure, adjoining to the boundary of facing – steel (dark arrows show the boundary, bright arrows show the defects of material structure)

характеризуется наличием микротрещин (рис. 5, в), микропор, расположенных строчками (рис. 5, а), протяженных прослоек второй фазы (рис. 5, б, г). Следует отметить, что микротрещины располагаются как вдоль границы раздела, так и под некоторым углом к ней, распространяясь в объем стали и/или наплавки.

Выводы. Установлено, что формирование наплавки на поверхности стали сопровождается созданием многослойной структуры, слои которой различаются морфологией элементов субструктуры. Выявлен градиентный характер структуры как наплавки в целом, так и каждого из обнаруженных слоев. Установлено, что граница раздела наплавка – сталь характеризуется наличием микропор и микротрещин, что указывает на присутствие в материале упругих напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.П. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
3. Электрошлаковая наплавка / Ю.М. Кусков, В.Н. Скороходов, И.А. Рябцев, И.С. Сарычев. – М.: Наука и технология, 2001. – 180 с.
4. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 292 с.
5. Тюрин Ю.М., Жадкевич М.Л. Плазменные технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 266 с.
6. Budovskikh E.A., Gromov V.E., Romanov D.A. The Formation Mechanism Providing High-Adhesion Properties of an Electric-Explosive Coating on a Metal Basis // Doklady Physics. 2013. Vol. 58. № 3. P. 82 – 84.
7. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: ООО «Полиграф», 2009. – 557 с.
8. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
9. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин, А.М. Филатов, А.Г. Уляненко. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.

Поступила 20 февраля 2014 г.

DEPTH STRUCTURE OF WEAR RESISTANCE COATING ON STEEL OBTAINED BY ELECTRIC ARC METHOD

Raikov S.V.¹, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Assist.
Professor of the Chair of Physics*

Kapralov E.V.¹, *Postgraduate*

Ivanov Yu.F.^{2,3}, *Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Re-
searcher*

Budovskikh E.A.¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair
of Physics*

Gromov V.E.¹, *Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the
Chair of Physics (gromov@physics.sibsiu.ru)*

¹ **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk,
Kemerovo Region, 654007, Russia)

² **Institute of High Current Electronics SB RAS** (2/3, Akademi-
cheskii ave., Tomsk, 634036, Russia)

³ **National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Rus-
sia)** (30, Lenina ave., Tomsk, 634036, Russia)

Abstract. It has been shown by scanning electron microscopy that the formation of the deposit facing on steel surface is accompanied by the creation of a multilayer structure including a layer of welding, transition layer and layer of the heat-affected zone. Crystallization of facing is accompanied by the formation of a columnar structure, which presents alternating layers of two types of thickness 8 – 10 microns. Layers of the first type are characterized by a lamellar structure oriented perpendicular to the substrate surface, the thickness of the separating plates and intermediate layers in the layer varies in the range of 50 – 100 nm. Layers of the second type have a structure of lamellar and globular type. On a distance from the surface facing the lamellar structure of the first type layers degenerates and completely disappears on the border with the transitional layer. The globules sizes vary in the range of 1.5 – 3.0 microns, globules are fragmented. The gradient nature of the structure is identified in the transition layer and the heat-affected zone also. It was established that the boundary facing – steel is in elastically stressed state, formed as a consequence of ultra-high heating and cooling velocities; this was evidenced by the presence of micropores and microcracks, located line-by-line, as well as by extended intermediate layers of the second phase.

Keywords: microarcing, flux-cored wire, structural-phase states, micro-hardness, wear resistance, friction coefficient.

REFERENCES

1. Khasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. (Translated from Japanese) Stepin V.S., Shesterkin N.G. eds. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 240 p. (In Russ.).
2. 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.).
3. Kuskov Yu.M., Skorokhodov V.N., Ryabtsev I.A., Sarychev I.S. *Elektroshlakovaya naplavka* [Electroslag facing]. Moscow: Nauka i tekhnologiya, 2001. 180 p. (In Russ.).
4. Gladkii P.V., Pereplechikov E.F., Ryabtsev I.A. *Plazmennaya naplavka* [Plasma facing]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007. 292 p. (In Russ.).
5. Tyurin Yu.M., Zhadkevich M.L. *Plazmennye tekhnologii* [Plasma technologies]. Kiev: Naukova dumka, 2008. 266 p. (In Russ.).
6. Budovskikh E.A., Gromov V.E., Romanov D.A. The Formation Mechanism Providing High-Adhesion Properties of an Electric-Explosive Coating on a Metal Basis. *Doklady Physics*. 2013, Vol. 58, no. 3, pp. 82–84.
7. Kovalenko V.V., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskaya priroda formirovaniya i evolyutsii gradientnykh strukturno-fazovykh sostoyanii v stalyakh i splavakh* [The physical nature of the formation and evolution of the gradient of structural-phase states in steels and alloys]. Novokuznetsk: Poligraf, 2009. 557 p. (In Russ.).
8. Brandon David G., Kaplan Wayne D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, New York, 1999. (Russ.ed.: Brandon D., Kaplan W. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 384 p.).
9. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ul'yanenko A.G. *Skaniruyushchaya elektronnyaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyi mikroanaliz v primerakh prakticheskogo primeneniya* [Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis: examples of practical application]. Moscow: Tekhnosfera, 2009. 208 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The study was financially supported by the RFBR, in the frame of the research project no. 13-02-12009 ofi_m, Ministry of Education and Science State order 2708G3 and project of FSR SB RAS (no. II.9.5.2).

Received February 20, 2014