

УДК 620.170:621.791:927

ГРАДИЕНТНАЯ СТРУКТУРА СЛОЯ, НАПЛАВЛЕННОГО НА СТАЛЬ HARDOX 450 ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe–C–Cr–Nb–W И МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ*

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsib.ru)

Кормышев В.Е.¹, инженер кафедры естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (8923623000@mail.ru)

Глезер А.М.², д.ф.-м.н., профессор, директор института металловедения и физики металлов
им. Г.В. Курдюмова (aglezer@mail.ru)

Коновалов С.В.³, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии
металлов и авиационного материаловедения (ksv@ssau.ru)

Иванов Ю.Ф.^{4,5}, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник (yuf55@mail.ru)

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

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

³ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
(443086, Россия, Самара, Московское шоссе, 34)

⁴ Институт сильноточной электроники СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

⁵ Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

Аннотация. В последние годы внимание исследователей в области физического материаловедения сосредоточено на изучении наплавки композиционных покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых фаз. Основным фактором, определяющим эксплуатационные свойства наплавленных слоев, является фазовый состав материала покрытий. Для обоснованного выбора материала покрытий, соответствующего условиям экстремальной эксплуатации, высоких нагрузок, абразивного изнашивания, необходимо проведение подробных исследований их свойств и структуры. В настоящей работе методами современного физического материаловедения исследованы структурно-фазовые состояния и трибологические свойства покрытия, наплавленного на мартенситную низкоуглеродистую сталь Hardox 450 порошковой проволокой системы Fe–C–Cr–Nb–W и модифицированного путем последующей электронно-пучковой обработки в различных режимах. Параметры пучка электронов на первом этапе: плотность энергии пучка электронов в импульсе $E_S = 30$ Дж/см², длительность импульсов $\tau = 200$ мкс, количество импульсов $N = 20$; на втором этапе: $E_S = 30$ Дж/см², $\tau = 50$ мкс, $N = 1$. Режимы облучения выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при облучении в одноимпульсном режиме. Показано, что электронно-пучковая обработка наплавленного слоя толщиной приблизительно 5 мм приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной около 20 мкм, основными фазами которого являются α -железо и карбид NbC, в незначительном количестве присутствуют карбиды составов Fe_3C и Me_6C (Fe_3W_3C). Основным отличием модифицированного путем электронно-пучковой обработки поверхностного слоя от немодифицированного объема наплавки являются морфология и размеры включений вторых фаз. В модифицированном слое наплавки включения имеют меньшие размеры и расположены в виде тонких прослоек по границам зерен. В немодифицированной наплавке основным морфологическим типом включений являются частицы ограниченной формы, хаотически расположенные в объеме зерна. После электронно-пучковой обработки износостойкость наплавленного слоя возрастает более чем в 70 раз по отношению к износостойкости стали Hardox 450, а коэффициент трения существенно снижается (примерно в три раза).

Ключевые слова: наплавка, структура, фазовый состав, электронно-пучковая обработка, морфология, карбиды, трибологические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-313-318

Из-за износа и коррозии деталей и конструкций ежегодные убытки в промышленности всех стран мира составляют миллиарды долларов. Борьба с изнашиванием и коррозией

осложнена тем, что использование объемно-легированных материалов, являвшееся до последнего времени основным способом решения этой задачи, становится все более проблематичным из-за истощения запасов легирующих элементов и значительного увеличения их стоимости.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФ (проект № 15-19-00065).

В последние годы получили развитие исследования в области наплавки композиционных покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых фаз [1 – 7]. Такие покрытия эффективно используют в условиях сильного абразивного изнашивания и ударных нагрузок и применяют в различных областях промышленности. Основными факторами, определяющими эксплуатационные свойства таких покрытий, являются химический и фазовый составы их материала [8 – 11]. Для обоснованного выбора материала покрытий, соответствующего условиям их эксплуатации, необходимо проведение подробных исследований их свойств и структуры [12 – 16].

При научно-практическом использовании различных видов наплавки в изделиях ответственного назначения необходим тщательный анализ соотношения параметры износа – твердость – микроструктура [17 – 20]. Только в этом случае возможно получить изделия с высокими эксплуатационными параметрами.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры, фазового состава и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки системы Fe–C–Cr–Nb–W, модифицированного путем последующей электронно-пучковой обработки.

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450, содержащую 0,19 – 0,26 % C; 0,70 % Si; 1,6 % Mn; 0,025 % P; 0,010 % S; 0,25 % Cr; 0,25 % Ni; 0,25 % Mo, 0,004 % B; остальное – железо (по массе). Эта сталь характеризуется низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего она хорошо сваривается и обрабатывается. Благодаря специальной системе закалки листов, которая заключается в быстром охлаждении прокатанного листа без последующего отпуска, достигается мелкозернистая структура стали и ее высокая твердость. Сталь является стойкой к большому числу видов износа.

Наплавку упрочняющего слоя осуществляли дуговой сваркой плавящимся металлическим электродом [21] в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки в среде защитного газа (98 % Ar, 2 % CO₂) при сварочном токе 250 – 300 А и напряжении 30 – 35 В. В качестве наплавляемого электрода использовали порошковую проволоку диам. 1,6 мм следующего химического состава: 1,3 % C; 7,0 % Cr; 8,5 % Nb; 1,4 % W; 0,9 % Mn, 1,1 % Si, остальное – железо (по массе). Наплавка приводит к формированию высокопрочного поверхностного слоя толщиной около 5 мм.

Модифицирование наплавленного слоя для повышения его трибологических свойств осуществляли путем электронно-пучковой обработки (ЭПО) на установке «СОЛО» [22] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации. Электронно-пучковую обработку проводили в два этапа: параметры пучка электронов на первом этапе – плотность энергии пучка электронов

в импульсе $E_S = 30$ Дж/см², длительность импульсов $\tau = 200$ мкс, количество импульсов $N = 20$; на втором этапе – $E_S = 30$ Дж/см², $\tau = 50$ мкс, $N = 1$. Режимы облучения были выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при облучении в одноимпульсном режиме [23]. Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments; контртело – шарик диам. 2 мм из твердого сплава ВК6, скорость износа оценивали по площади поперечного сечения трека износа, используя 3D-профилометр MICRO MEASURE 3D station фирмы STIL. Структуру объема модифицированного слоя анализировали методом поперечного шлифа, для чего образцы разрезали на две части перпендикулярно поверхности модифицирования. Дефектную структуру материала изучали методами оптической (микроскоп «Микровизор металлографический μ Vizo – MET-221»), сканирующей (сканирующий электронный микроскоп «SEM-515 Philips») и просвечивающей дифракционной (приборы ЭМ-125 и FEI Tecnaï 20 G2 TWIN) электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микроанализатора EDAX ECON IV, являющийся приставкой к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips»). Анализ фазового состава поверхностного слоя выполняли методами дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония).

Электронно-пучковая обработка наплавленного слоя приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной до 20 мкм (рис. 1, а). Модифицированный слой отличается от основного объема наплавленного материала степенью дисперсности структуры, выявленной при ионном травлении поперечного шлифа.

В модифицированном слое формируется структура, размеры элементов травления которой (очевидно, тугоплавкие соединения, обладающие сравнительно низким уровнем травления ионным пучком) изменяются в пределах от 150 до 750 нм (рис. 1, б). В объеме наплавленного слоя, не подвергавшемся облучению электронным пучком, размеры вытравленных элементов структуры достигают 1,5 мкм (рис. 1, в).

На рис. 2 приведены характерные ПЭМ изображения структуры наплавленного слоя после ЭПО. Отчетливо видно, что α -фаза имеет пластинчатую структуру и сформировалась в результате мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Включения второй фазы (на рис. 3 указаны стрелками) расположены преимущественно по границам зерен в виде протяженных прослоек, толщина которых 100 – 150 нм. Включения второй фазы расположены в стыках зерен, имеют форму растянутого тройного узла; размеры таких включений достигают 1 мкм.

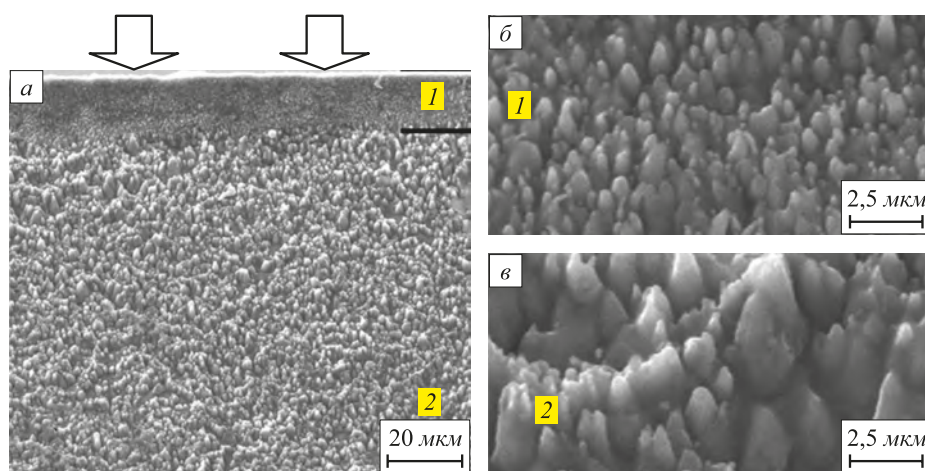


Рис. 1. Структура наплавленного слоя, поперечный травленный шлиф (стрелками указана поверхность облучения наплавленного слоя импульсными электронными пучками):

1 – слой, модифицированный электронно-пучковой обработкой; 2 – основной объем наплавки

Fig. 1. Structure of the faced layer. Transverse etched metallographic section. Arrows designate the irradiation surface of the faced layer with pulse electron beams. The figures designate:

1 – the layer modified by electron beam processing; 2 – main volume of facing

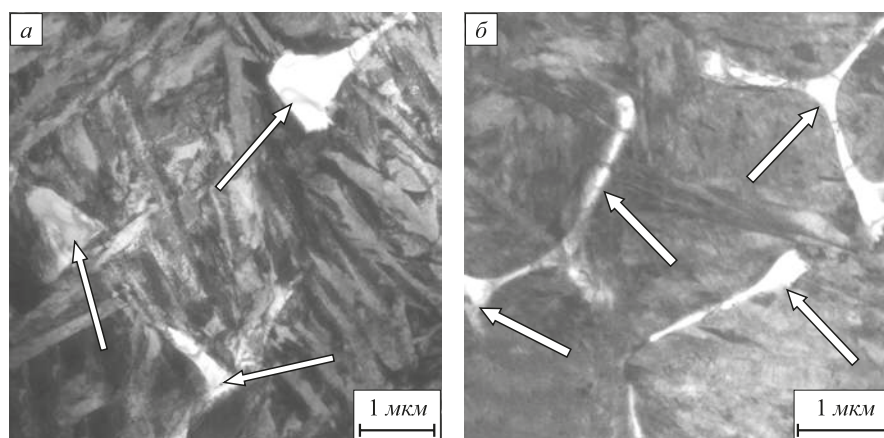


Рис. 2. Характерные ПЭМ изображения структуры наплавленного слоя после ЭПО (стрелками указаны включения второй фазы)

Fig. 2. TEM image of faced layer surface after electron beam processing. Arrows designate the second phase inclusions

Методами микродифракционного анализа с привлечением темнопольной методики было показано, что включения второй фазы, расположенные по границам зерен в виде прослоек, являются карбидом состава Me_6C (Fe_3W_3C) (рис. 3, а). В объеме и вдоль границ кристаллов мартенсита обнаружены частицы карбида железа состава Fe_3C (возможно, Me_3C) (рис. 3, б).

Структура поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивными импульсными электронными пучками, характеризуется присутствием включений карбида ниобия ограненной формы, расположенных хаотически в объеме зерен. Размеры таких включений достигают 2 мкм.

Таким образом, методами электронной дифракционной микроскопии показано, что поверхностный слой наплавки, модифицированный интенсивным импульсным электронным пучком, это многофазный агрегат, основ-

ными фазами которого являются твердый раствор на основе α -железа и карбиды составов Me_6C , NbC и Fe_3C .

Для слоя наплавленного металла, расположенного на расстоянии приблизительно 5 мм от поверхности ЭПО, основным типом включений также являются карбиды ниобия ограненной формы.

Основным отличием поверхностного слоя после ЭПО от немодифицированного объема наплавки являются морфология и размеры включений второй фазы. В модифицированном слое наплавки включения имеют меньшие размеры (по сравнению с объемом наплавки) и расположены преимущественно в виде сравнительно тонких прослоек по границам зерен. В объеме наплавки, не модифицированной электронно-пучковой обработкой, основным морфологическим типом включений являются частицы ограненной формы, расположенные хаотически в объеме зерна.

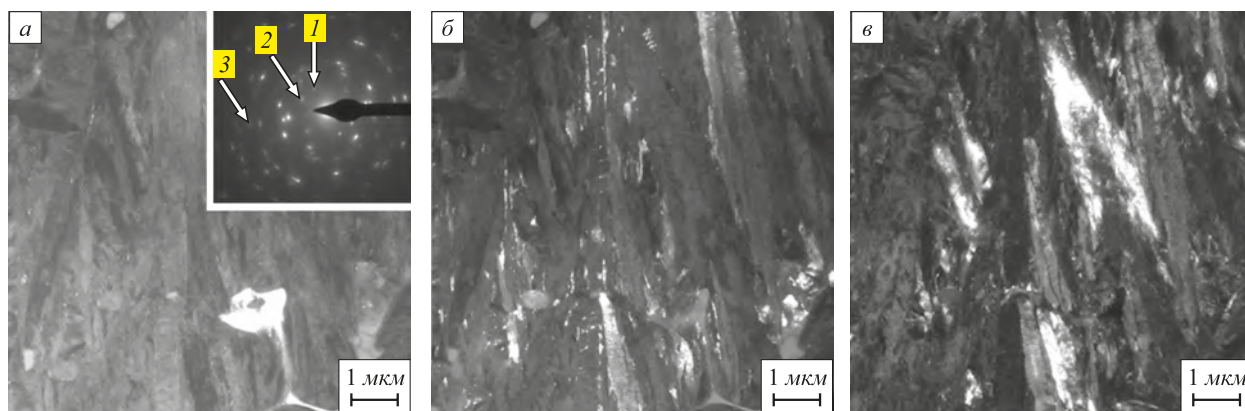


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя, облученного интенсивными импульсными электронными пучками:

a – *в* – темное поле, полученное в рефлексе $[511] Me_6C (Fe_3W_3C)$ (*a*), $[110] \alpha-Fe + [102] Fe_3C$ (*б*), $[024] \alpha-Fe$ (*в*) (на микроэлектроннограмме (вставка на поз. *a*) указаны рефлексы, в которых были получены темнопольные изображения 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*))

Fig. 3. Electron-microscopy image of faced layer structure irradiated by intense pulse electron beams:

a – *в* – dark field obtained in reflections $[511] Me_6C (Fe_3W_3C)$ (*a*), $[110] \alpha-Fe + [102] Fe_3C$ (*б*), $[024] \alpha-Fe$ (*в*). Microelectron diffraction pattern shows (insert in *a*) the reflections of obtaining dark field images 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*))

Формирование наплавленного слоя приводит к увеличению износостойкости более чем в 70 раз по отношению к износостойкости стали. При этом коэффициент трения снижается до трех раз.

Выводы. Исследована структура, фазовый состав и трибологические свойства слоя, наплавленного на сталь Hardox 450 порошковой проволокой системы Fe–C–Cr–Nb–W и модифицированного путем последующей электронно-пучковой обработки. Показано, что электронно-пучковая обработка поверхности наплавки приводит к измельчению структуры и изменению морфологии карбидной фазы слоя, а также существенному повышению износостойкости и снижению коэффициента трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadia H., Gola A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays // *J. Manuf. Process.* 2014. Vol. 16. P. 4 – 25.
- Thorpe W.R., Chicco B. On the formation of duplex eutectic carbides in commercially important white irons // *Mater. Sci. Eng.* 1981. Vol. 51. P. 11 – 19.
- Randle V., Laird G. Microtexture Study of Eutectic Carbides in White Cast Iron Using Electron Backscatter Diffraction // *J. Mater. Sci.* 1993. Vol. 28. P. 4245 – 4249.
- Pearce J.T.H., Elwell D.W.L. Duplex Nature of Eutectic Carbides in Heat Treated 30 % Chromium Cast Iron // *J. Mater. Sci. Lett.* 1986. Vol. 5. P. 1063 – 1064.
- Wiengmoon A., Chairuangri T., Brown A., Brydson R., Edmonds D.V., Pearce J.T.H. Microstructural and crystallographical study of carbides in 30 wt. % Cr cast irons // *Acta Mater.* 2005. Vol. 53. P. 4143 – 4154.
- Chen Xizhang, Shen Zheng, Chen Xing, Lei Yucheng, Huang Qunying. Corrosion behavior of CLAM steel weldment in flowing liquid Pb-17Li at 480 °C // *Fusion Engineering and Design.* 2011. Vol. 86. No. 12. P. 2943 – 2948.
- Chen Xizhang, Fang Yuan Yuan, Li Peng, Yu Zhenzhen, Wu Xiaodong, Li Dongsheng. Microstructure, residual stress and mechanical properties of a high strength steel weld using low transformation temperature welding wires // *Materials & Design.* 2015. Vol. 65. P. 1214 – 1221.
- Коновалов С.В., Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. Электронно-пучковая модификация упрочненного слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки системы Fe-C-V-Cr-Nb-W // *Письма о материалах.* 2016. Т. 6. № 4. С. 350 – 354.
- Marquez-Herrera A., Fernandez-Munoz J.L., Zapata-Torres M. et al. Fe₃B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance // *Surface and Coatings Technology.* 2014. Vol. 254. P. 433 – 439.
- Zahiri R., Sundaramoorthy R., Lysz P., Subramanian C. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding // *Surface and Coatings Technology.* 2014. Vol. 260. P. 220 – 229.
- Li R., Zhou Z., He D. et al. Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed FeCrSiB coating // *Journal of Thermal Spray Technology.* 2015. Vol. 24. No. 5. P. 857 – 864.
- Kapralov E.V., Raikov S.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Vashchuk E.S., Ivanov Yu.F. Structural phase states and properties of coatings welded onto steel surfaces using powder // *Bulletin of the Russian academy of sciences. Physics.* 2014. Vol. 78. No. 10. P. 1015 – 1021.
- Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А. Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // *Успехи физики металлов.* 2014. Т. 15. № 4. С. 213 – 234.
- Konovalev S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Kapralov E.V., Semin A.P. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel // *Journal of Surface Investigation.* 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1119 – 1124.
- Berns H., Fischer A. Microstructure of Fe-Cr-C Hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and B // *Mater. Charact.* 1997. Vol. 39. P. 499 – 527.
- Berns H., Fischer A. Abrasive wear resistance and microstructure of Fe-Cr-C-B hard surfacing weld deposits // *Wear.* 1986. Vol. 112(2). P. 163 – 180.
- Yüksel N., Şahin S. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys // *Materials & Design.* 2014. Vol. 58. P. 491 – 498.
- Venkatesh B., Sriker K., Prabhakar V.S.V. Wear characteristics of hardfacing alloys: state-of-the-art // *Procedia Materials Science.* 2015. Vol. 10. P. 527 – 532.

19. Gualco A., Marini C., Svoboda H., Surian E. Wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing // *Procedia Materials Science*. 2015. Vol. 8. P. 934 – 943.
20. Teker T., Karatas S., Osman Yilmaz S. Microstructure and wear properties of AISI 1020 steel surface modified by HARDOX 450 and FeB powder mixture // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2014. Vol. 50. No. 1. P. 94 – 103.
21. Малыш В.М., Сорока М.М. Электрическая сварка. – Киев: Техника, 1986. – 111 с.
22. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. 2008. Т. 51. № 5. С. 60 – 70.
23. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.

Поступила 15 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 4, pp. 313–318.

GRADIENT STRUCTURE OF THE LAYER FACED ON HARDOX 450 STEEL WITH Fe–C–Cr–Nb–W POWDER WIRE AND MODIFIED BY ELECTRON BEAM PROCESSING

V.E. Gromov¹, V.E. Kormyshev¹, A.M. Glezer², S.V. Kononov³, Yu.F. Ivanov^{4,5}

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

³Samara University, Samara, Russia

⁴Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

⁵National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. In recent years, the attention of researches in the field of physical materials science is focused on the study of facing of composite coatings hardened with the particles of carbides, borides and other high solid phases. The principal factor determining the service properties of the faced layers is phase composition of coating materials. In order to make substantiated choice of coating material corresponding to the conditions of their extreme service, high loads and abrasive wear it is necessary to carry out thorough studies of their properties and structure. Structure-phase states and tribological properties of coating faced on Hardox 450 martensite low carbon steel with Fe–C–Cr–Nb–W powder wire and modified by subsequent electron beam processing were studied in the research using methods of modern materials science. The regime of electron beam processing is the following: parameters of electron beam at the first stage – energy density of electron beam in pulse $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$, duration of pulses $\tau = 200 \text{ } \mu\text{s}$, number of pulses $N = 20$; at the second stage – $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$, $\tau = 50 \text{ } \mu\text{s}$, $N = 1$. The regimes of irradiation were chosen based on calculation results of temperature field being formed in surface layer of material in one pulse regime irradiation. It is shown that electron beam processing of ~5 mm thick faced layer results in formation of ~20 μm thick modified surface layer with α -Fe and NbC carbide major phases and negligible quantity of Fe_3C and Me_6C ($\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$) carbides. The principle difference of the surface layer modified by electron beam processing from the unmodified volume of facing is morphology and dimensions inclusions of the second phases. In the facing modified layer inclusions have smaller dimensions and are located in form of thin interlayers along the grain boundaries. In the unmodified facing, basic morphological type of inclusions is particles of faceted shape located chaotically in grain volume. After electron beam processing wear resistance of the faced layer increases in more than 70 times in relation to wear resistance of Hardox 450 steel and friction coefficient decreases significantly (in ~3 times).

Keywords: facing, structure, phase composition, electron beam processing, morphology, carbides, tribological properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-313-318

REFERENCES

1. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadia H., Gola A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays. *J. Manuf. Process*. 2014, vol. 16, pp. 4–25.

2. Thorpe W.R., Chicco B. On the formation of duplex eutectic carbides in commercially important white irons. *Mater. Sci. Eng.* 1981, vol. 51, pp. 11–19.
3. Randle V., Laird G. Microtexture Study of eutectic carbides in white cast iron using electron backscatter diffraction. *J. Mater. Sci.* 1993, vol. 28, pp. 4245–4249.
4. Pearce J.T.H., Elwell D.W.L. Duplex nature of eutectic carbides in heat treated 30% chromium cast iron. *J. Mater. Sci. Lett.* 1986, vol. 5, pp. 1063–1064.
5. Wiengmoon A., Chairuangri T., Brown A., Brydson R., Edmonds D.V., Pearce J.T.H. Microstructural and crystallographical study of carbides in 30 wt.% Cr cast irons. *Acta Mater.* 2005, vol. 53, pp. 4143–4154.
6. Chen Xizhang, Shen Zheng, Chen Xing, Lei Yucheng, Huang Qunying. Corrosion behavior of CLAM steel weldment in flowing liquid Pb-17Li at 480 °C. *Fusion Engineering and Design*. 2011, vol. 86, no. 12, pp. 2943–2948.
7. Chen Xizhang, Fang Yuanyuan, Li Peng, Yu Zhenzhen, Wu Xiaodong, Li Dongsheng. Microstructure, residual stress and mechanical properties of a high strength steel weld using low transformation temperature welding wires. *Materials & Design*. 2015, vol. 65, pp. 1214–1221.
8. Kononov S.V., Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Electron-beam processing of the hardened layer formed on Hardox 450 steel electric-wire welding system Fe–C–V–Cr–Nb–W. *Letters on Materials*. 2016, vol. 6, no. 4, pp. 350–354. (In Russ.)
9. Marquez-Herrera A., Fernandez-Munoz J.L., Zapata-Torres M. etc. Fe_2B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 254, pp. 433–439.
10. Zahiri R., Sundaramoorthy R., Lysz P., Subramanian C. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 260, pp. 220–229.
11. Li R., Zhou Z., He D. et al. Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed FeCrSiB coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015, vol. 24, no. 5, pp. 857–864.
12. Kapralov E.V., Raikov S.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Vaschuk E.S., Ivanov Yu.F. Structural phase states and properties of coatings welded onto steel surfaces using powder. Bulletin of the Russian academy of sciences. *Physics*. 2014, vol. 78, no. 10, pp. 1015–1021.
13. Gromov V.E., Kapralov E.V., Raikov S.V., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A. Structure and properties of wear-resistant coatings deposited by electric arc method on steel with flux cored wires. *Uspekhi fiziki metallov*. 2014, vol. 15, no. 4, pp. 213–234. (In Russ.)
14. Kononov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V., Semin A.P. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel. *Journal of Surface Investigation*. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1119–1124.
15. Berns H., Fischer A. Microstructure of Fe–Cr–C Hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and B. *Mater. Charact.* 1997, vol. 39, pp. 499–527.

16. Berns H., Fischer A. Abrasive wear resistance and microstructure of Fe-Cr-C-B hard surfacing weld deposits. *Wear*. 1986, vol. 112 (2), pp. 163–180.
17. Yüksel N., Şahin S. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys. *Materials & Design*. 2014, vol. 58, pp. 491–498.
18. Venkatesh B., Sriker K., Prabhakar V.S.V. Wear characteristics of hardfacing alloys: state-of-the-art. *Procedia Materials Science*. 2015, vol. 10, pp. 527–532.
19. Gualco A., Marini C., Svoboda H., Surian E. Wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. *Procedia Materials Science*. 2015, vol. 8, pp. 934–943.
20. Teker T., Karatas S., Osman Yilmaz S. Microstructure and wear properties of AISI 1020 steel surface modified by HARDOX 450 and FeB powder mixture. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2014, vol. 50, no. 1, pp. 94–103.
21. Malysh V.M., Soroka M.M. *Elektricheskaya svarka* [Electric welding]. Kiev: Tekhnika, 1986, 111 p. (In Russ.).
22. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of cermet and ceramic materials with pulsed electron beam treatment. *Izv. vuz. Fizika*. 2008, vol. 51, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).
23. *Evolutsiya struktury poverkhnostnogo sloya stali, podvergnutoi elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of

structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing]. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. eds. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016, 304 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the RNF grant (project No. 15-19-00065).

Information about the authors:

V.E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

V.E. Kormyshev, Engineer of the Chair of Science named after V.M. Finkel (8923623000@mail.ru)

A.M. Glezer, Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor, Director of the G.V. Kurdymov Institute of Metallurgy and Physics of Metals (aglezer@mail.ru)

S.V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials (ksv@ssau.ru)

Yu.F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher (yuf55@mail.ru)

Received December 15, 2016