УДК 620.170:621.791:927.

Модифицирование электроннопучковой обработкой поверхностного слоя наплавки, сформированной на стали Hardox 450

электроконтактным методом

Ю. Ф. Иванов^{1, 2}, В. Е. Громов³, В. Е. Кормышев³, А. М. Глезер⁴, С. В. Коновалов^{3, 5}, А. Д. Тересов²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск. E-mail: yufi55@mail.ru ² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск.

³ Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

⁴ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П.Бардина", г. Москва.

⁵ Самарский национальный исследовательский университет имени

академика С.П. Королева, г. Самара. E-mail: ksv@ssau.ru

Методами современного физического материаловедения исследованы структура, фазовый состав, дефектная субструктура и трибологические свойства покрытия, сформированного на мартенситной низкоуглеродистой стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки Fe – C – Ni – B и модифицированного последующим облучением высокоинтенсивными импульсными электронными пучками. Показано, что такая обработка приводит к формированию поверхностного слоя толщиной 50 мкм, основными фазами которого являются α-фаза, борид железа FeB и карбид бора B₄C. В обработанном слое наплавки поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита уменьшаются в 3 раза по сравнению с исходной сталью Hardox 450 и составляют 50 – 70 нм. Одной из основных причин такого изменения может быть сверхвысокая скорость охлаждения поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивными импульсными электронными пучками. Износостойкость наплавленного слоя после электронными за корость быть сверхвысокая корость охлаждения поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивными импульсными электронными пучками. Износостойкость наплавленного слоя после электронно-пучковой обработки возрастает более, чем в 20 раз по отношению к износостойкости стали Hardox 450, а коэффициент трения уменьшается в 3,5 раза.

Ключевые слова: наплавка, электронно-пучковая обработка, структура, фазовый состав, карбид бора, борид железа, износостойкость.

Methods of the physical material science have been applied to study the structure, phase composition, defect substructure and tribological properties of the coating formed on Hardox 450 martensitic low-carbon steel with electrocontact facing of the Fe – C – Ni – B wire and modified by the subsequent high intensity pulsed electron beam irradiation. It was established that this processing resulted in the formation of 50 µm thick surface layer with the main phases: α , iron boride FeB and boron carbide B₄C. The transverse dimensions of crystallites of packet martensite in the processed layer decreased 3-fold as compared to the initial Hardox 450 steel and they measured 50-70 nm. The super high cooling rate of facing surface layer after irradiation with intense pulsed electron beams might be one of the principal causes of such change. The wear resistance of the faced layer after electron beam processing increased more than 20-fold in relation to wear resistance of Hardox 450 steel and friction coefficient decreased 3,5-fold.

Keywords: facing, electron-beam processing, structure, phase composition, boron carbide, iron boride, wear resistance.

Введение

Наиболее перспективными методами упрочнения и восстановления, позволяющими радикально улучшить свойства поверхностей, являются экономически эффективные методы наплавки [1, 2], поскольку ресурс работы деталей преимущественно определяется долговечностью покрытий. Такие покрытия эффективно работают в экстремальных условиях абразивного износа, коррозии, высоких механических нагрузок и температур [3-5] и применяются в разных отраслях промышленности. Обоснованный выбор материала покрытий, соответствующий условиям их эксплуатации, должен основываться на анализе структурно-фазовых состояний [6-9]. При этом для изделий ответственного назначения, работающих в условиях сильного изнашивания, особое внимание следует обратить на соотношение "трибологические свойства - микроструктура" [10, 11]. Только в этом случае возможно получать изделия с высокими эксплуатационными характеристиками.

Целью настоящей работы являлся анализ результатов, полученных при исследовании структуры и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой порошковой проволоки системы Fe – C – Ni – В и модифицирующим облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материал и методика исследования

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450 (состав, масс. %: 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 — Fe). Она характеризуется низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего хорошо сваривается и обрабатывается. Благодаря специальной системе закалки листов, суть которой заключается в быстром охлаждении прокатанного листа без последующего отпуска, достигается мелкозернистая структура стали и ее высокая твердость. Благодаря этому сталь эффективно противостоит большинству видов износа. Наплавку упрочняющего слоя осуществляли методом MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas — дуговая сварка плавящимся металлическим электродом в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки) в среде газа (Ar — 98 %, CO₂ — 2 %) при сварочном токе 250 - 300 А и напряжении 30-35 В. В качестве наплавляемого электрода использовали порошковую проволоку следующего химического состава, масс. %: 0,7 C; 2,0 Mn, 1,0 Si, 2,0 Ni, 4,5 B, остальное — Fe.

Модифицирование наплавленного слоя осуществляли, облучая поверхность высокоинтенсивным электронным пучком на установке "СОЛО" [12] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации в два этапа: параметры пучка электронов на первом этапе — плотность энергии пучка электронов в импульсе $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$; длительность импульсов $\tau = 200$ мкс; количество импульсов N = 20; на втором этапе — $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 50$ мкс; N = 1. Режимы облучения были выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при облучении в одноимпульсном режиме [13]. Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре "CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142", CSEM Instruments; контртело — шарик диаметром 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 µVizo - MET-221"), сканирующей (сканирующий электронный микроскоп "SEM-515 Philips") и просвечивающей дифракционной (приборы "ЭМ-125 FET" и "Tecnai 2062 TWIN") электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор "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).

Результаты исследования и их обсуждение

Облучение наплавленного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной до 50 мкм (рис. 1*a*, слой 1). Модифицированный слой отличается от основного объема наплавленного материала степенью дисперсности структуры, выявленной при ионном травлении поперечного шлифа. Сравнивая

Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов и др. Модифицирование электронно-пучковой обработкой...



Рис. 1. Структура наплавленного слоя, поперечный травленый шлиф. Стрелками указана поверхность облучения наплавленного слоя импульсным интенсивным электронным пучком. Цифрами обозначено: 1 — слой, модифицированный электронным пучком; 2 — основной объем наплавки.

изображения структуры наплавленного слоя, приведенные на рис. 16 и 16, можно обнаружить, что облучение материала наплавки интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается формированием структуры, размеры элементов



Рис. 2. Участок рентгенограммы, полученной с поверхностного слоя наплавки толщиной 10 мкм, обработанной интенсивным импульсным электронным пучком. Стрелками 1, 2, 3 указаны дифракционные максимумы, принадлежащие карбобориду железа состава Fe₃(B_{0,7}C_{0,3}) и бориду железа состава FeB₂ (стрелка 4).

травления которой (очевидно, тугоплавкие соединения, обладающие сравнительно низким уровнем травления ионным пучком) изменяются в пределах от 200 нм до 500 нм (рис. 1 σ). В объеме наплавленного слоя, не подвергавшемся облучению электронным пучком (рис. 1a, слой 2), размеры вытравленных элементов структуры достигают 1,0 мкм (рис. 1 σ).

Характерная рентгенограмма, полученная с поверхностного слоя наплавки толщиной 10 мкм, облученной электронным пучком, приведена на рис. 2. Анализ рентгенограмм показал, что основными фазами исследуемого слоя наплавленного металла являются твердый раствор на основе α -железа (объемноцентрированная кристаллическая решетка), борид железа состава FeB₂ и карбоборид железа состава Fe₃(B_{0,7}C_{0,3}). Относительное содержание фаз, выявленное по площади идентифицированных рефлексов, составило: α -Fe = 59 %; FeB₂ = 12 %; Fe₃(B_{0,7}C_{0,3}) = 16 % (остальное — нерасшифрованные рефлексы).

Морфологию фаз и дефектную субструктуру поверхностного слоя наплавленного материала анализировали методами просвечивающей

Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов и др. Модифицирование электронно-пучковой обработкой...



Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя, расположенного на расстоянии ≈ 2 мм от поверхности облучения электронным пучком (середина наплавленного слоя). Стрелками на *a* и *в* указаны включения второй фазы; на *б* приведена микроэлектронограмма, полученная с участка фольги, обозначенного овалом на а; стрелкой на б указан рефлекс [020] Fe₂B.

электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. На рис. 3 приведены характерные изображения структуры слоя, расположенного на расстоянии ≈ 2 мм от поверхности облучения электронным пучком (середина наплавленного слоя). Отчетливо видно, что основу анализируемого слоя составляет структура пластинчатого типа. Микродифракционный анализ показывает, что это а-фаза, сформировавшаяся в результате мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Включения второй фазы (указаны стрелками на рис. 3*a*, 3*b*) расположены по границам зерен в виде протяженных прослоек, толщина которых 100 - 250 нм и в объеме зерен в виде частиц глобулярной или ограненной формы. Размеры таких включений могут достигать 2,5 мкм (рис. 3). Анализ микроэлектронограмм показывает, что включениями второй фазы являются преимущественно бориды железа состава Fe₂B (рис. 3*б*). Следует отметить, что по границам кристаллов мартенсита весьма часто обнаруживаются тонкие (десятки нанометров) прослойки второй фазы, которые являются карбидом железа состава Fe₃C.



Рис. 4. Электронно-микроскопические изображение структуры α-фазы (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), сформировавшейся в результате высокоскоростного охлаждения поверхностного слоя наплавки, подвергнутой облучения интенсивным импульсным электронным пучком.



Рис. 5. Электронно-микроскопические изображение включений второй фазы, расположенных в поверхностном слое наплавки, подвергнутой облучения интенсивным импульсным электронным пучком.

Облучение поверхности наплавленного слоя приводит к существенному изменению фазового состава и дефектной субструктуры материала. Прежде всего, обращает на себя внимание существенное уменьшение поперечных размеров кристаллов мартенсита (рис. 4). Если в стали, закаленной с печного нагрева, средние поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита составляют 150 – 200 нм [14], то в модифицированном электронно-пучковой обработкой слое наплавки поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита изменяются в пределах 50 – 70 нм (рис. 4 δ). Одной из причин такого изменения поперечных размеров кристаллов мартенсита может быть сверхвысокая (до 10⁶ K/c) скорость охлаждения поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивным импульсным электронным пучком. Другой возможной причиной являются малые объемы γ -фазы, расположенные между включениями второй фазы (рис. 4a).

Поверхностный слой облученной наплавки является, как уже отмечалось выше, многофазным материалом. Прежде всего обращает на себя внимание относительно высокий уровень содержания включений второй фазы, что следует из анализа микрофотографий, представленных на рис. 3 и 5. Включения, расположенные в поверхностном слое, имеют разнообразную форму, их размеры не превышают 1 - 1,5 мкм. Методами микродифракционного анализа с привлечением темнопольной методики был проведен анализ фазового состава модифицированного слоя наплавки. Результаты такого анализа выявили присутствие в поверхностном слое следующих фаз: FeB (рис. 6*a*) и B₄C (рис. 6*b*).

Таким образом, методами электронной дифракционной микроскопии показано, что поверхностный слой наплавки, модифицированный



Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности наплавленного слоя, после электронно-пучковой обработки; *а* — светлое поле; *б*, *в* — светлые поля; *б*, *г* — микроэлектронограммы, полученные с областей, выделенных на *а* и *в* окружностями. Стрелками на *б* указаны рефлексы фазы FeB: 1 — [011]; 2 — [111]; на *г* указаны рефлексы фазы B₄C: 1 — [012]; 2 — [110].

Таблица 1

Условия, при которых проводили съемку рентгенограмм наплавленного слоя

Measurement Condition	Slits	Scanning
X-ray tube	divergence slit = 1.00000 (deg)	drive axis = Theta $- 2$ Theta
target = Cu	scatter slit = 1.00000 (deg)	scan range = $10.000 - 100.000$
volt = 40.0 (kV)	receiving slit = 0.15000 (mm)	scan mode = Fixed Time
current = 30.0 (mA)		scan speed = 1.0000 (deg/min)
		sampling pitch = 0.0300 (deg)
		preset time $= 2.00$ (s)

Таблица 2

Результаты трибологических испытаний

	Коэффициент трения μ	Скорость износа, мм ³ /(Н·м)
Сталь Hardox 450	0,31	5,4
Наплавленный слой	0,14	2,8
Наплавленный слой после электронно-	0,09	0,24
пучковой обработки		

интенсивным импульсным электронным пучком, является многофазным агрегатом. Основными фазами являются твердый раствор на основе α -железа, борид железа состава FeB и карбид бора состава B₄C. Не следует также исключать присутствия карбидов (карбоборидов) железа состава Fe₃C или Fe₃(C, B).

Формирование наплавленного слоя приводит к увеличению износостойкости стали. Выполненные испытания выявили увеличение износостойкости наплавленного слоя, модифицированного интенсивным импульсным электронным пучком, более чем в 20 раз по отношению к износостойкости стали и более чем в 11 раз по отношению к наплавленному слою, немодифицированному электронным пучком (табл. 1, 2). Существенным образом сни-



Рис. 7. Зависимость коэффициента трения µ от длины трека *L* трибологических испытаний. На вставке приведены условия трибологических испытаний.

жается коэффициент трения наплавленного слоя, облученного электронным пучком. Для исходной стали он равен 0,31; для наплавленного слоя — 0,14; после облучения наплавленного слоя электронным пучком коэффициент трения равен 0,09.

На рис. 7 приведено изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях наплавленного слоя, модифицированного электронным пучком. Обращает на себя внимание двухстадийный характер изменения коэффициента трения. На первой стадии величина коэффициента трения составляет $\approx 0,07$, на второй стадии $\approx 0,11$. Коэффициент трения стали без наплавки $\approx 0,31$. Анализируя изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях (рис. 7), можно предположить, что облучение наплавленного слоя интенсивным импульсным электронным пучком приводит к существенному (в $\approx 3,5$ раза) снижению коэффициента трения наплавленного слоя.

Заключение

Проведены исследования фазового состава, дефектной субструктуры и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки системы Fe – C – Ni – В и модифицированного облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что электронно-пучковая обработка поверхности наплавки приводит к формированию многофазного состояния, основными фазами которого являются α-фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), борид железа состава FeB и карбид бора состава B_4C . Сформированная облучением интенсивным импульсным электронным пучком структура наплавки характеризуется высоким значением износостойкости, более чем в 20 раз превышающим износостойкость стали и более чем в 11 раз износостойкость наплавленного слоя, не модифицированного электронным пучком, и сравнительно низким (в \approx 3,5 раза ниже коэффициента трения стали) значением коэффициента трения.

Исследования структуры, фазового состава и свойств выполнены за счет средств гранта РНФ (проект №15-19-00065). Электронно-пучковая обработка наплавленного слоя выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 16-43-700659 р а).

Литература

- Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Структура и свойства композиционных износостойких наплавок на сталь: монография. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014, 109 с.
- 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. С. 211 – 232.
- Marquez-Herrera A., Fernandez-Munoz J.L., Zapata-Torres M. et al. Fe₂B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance. // Surface and Coatings Technology. 2014. V. 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. V. 260. P. 220-229.
- 5. Li R., Zhou Z., He D. et al. Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed

FeCrSiB coating. // J. Thermal Spray Technology. 2015. V. 24. No 5. P. 857 – 864.

- Yüksel N., Şahin S. Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe – Cr – C and Fe – Cr – C – B based hardfacing alloys. // Materials & Design. 2014. V. 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. V. 10. P. 527 – 532.
- Gualco A., Marini C., Svoboda H., Surian E. Wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. // Procedia Materials Science. 2015. V. 8. P. 934 – 943.
- 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. V. 50. No. 1. P. 94 – 103.
- 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. V. 78. No. 10. P. 1015 – 1021.
- Popova N.A., Nikonenko E.N., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Budovskikh E.A., Raikov S.V., Kapralov E.V., Vashuk E.S. Structure and properties of wear-resistant weld deposit formed on martensitic steel using the electric-arc method. // Advanced Materials Research. 2014. V. 1013. P. 194 – 199.
- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. // Известия ВУЗов. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.
- Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки, под ред. Коваля Н.Н., Иванова Ю.Ф. Томск: Изд-во НТЛ, 2016, 304 с.
- Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977, 236 с.

ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ 2017 № 2