

Ю.А. Рубанникова, В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, Д.А. Косинов, Д.А. Романов

Сибирский государственный индустриальный университет

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НАПЛАВКОЙ Порошковой борсодержащей проволокой*

В настоящее время вопрос о выборе метода эффективной защиты различных изделий и деталей между упрочнением всего объема материала и нанесением на рабочие части изделий защитных покрытий в большинстве случаев решается однозначно в пользу последнего метода. Это объясняется тем, что наибольшее разрушение в процессе эксплуатации испытывает именно поверхность. Наиболее перспективным методом упрочнения и восстановления, позволяющим радикально улучшить свойства поверхностей, является наплавка. Кроме того, упрочнение методом наплавки оказывается экономически эффективным, поскольку ресурс работы деталей определяется преимущественно долговечностью покрытий, которая зависит от способа нанесения, качества и состава покрытия.

Для защиты металлов и сплавов от различных видов внешних воздействий (износа, коррозии, высоких температур, статических и динамических нагрузжений) используются лазерные, плазменные, электронно-лучевые, электродуговые и др. методы нанесения покрытий. Большую практическую значимость имеют покрытия, сочетающие в себе ряд свойств, например, износостойкость и коррозионную стойкость [1].

Подобные покрытия могут быть получены путем вневакуумной электронно-лучевой наплавки на ускорителе релятивистских электронов. Метод электронно-лучевой наплавки и результаты исследований подобных покрытий описаны в работе [2].

Проблема повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов в настоящее время решается за счет целенаправленного и контролируемого изменения свойств их рабочих поверхностей. Получение покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими повышение надежности и долговечности работы изделий в экстремальных условиях, которые характеризуются повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием

агрессивных сред и циклическим воздействием, является фундаментальной задачей [3, 4].

Целью настоящей работы является анализ структуры, фазового состава и трибологических свойств слоя, наплавленного электродуговым методом борсодержащей порошковой проволокой.

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450, элементный состав которой представлен в табл. 1.

Сталь Hardox 450 предназначена для работы в определенных условиях: к этой стали предъявляются особые требования по износостойкости в сочетании с хорошими свойствами холодной гибки и хорошей свариваемостью. Высокая твердость стали Hardox достигается за счет специальной системы закалки листов, в результате которой металл приобретает мартенситную структуру. Суть закалки заключается в быстром охлаждении прокатанного листа без последующего отпуска. Такая закалка позволяет получать металл с мелкозернистой структурой.

В связи с необходимостью увеличения срока службы металлических изделий на поверхности стальных образцов методом MIG / MAG сварки (MetalInertGas / MetalActiveGas – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки) был сформирован наплавочный слой порошковой проволокой диам. 1,6 мм [5, 6]. Для исследований была выбрана порошковая проволока Fe – C – Ni – B, химический состав которой приведен в табл. 2.

Формирование наплавленного слоя на поверхности стали осуществляли в среде защитного газа, содержащего 98 % Ar и 2 % CO₂, сварочный ток находился в пределах 250 – 300 А, напряжение на дуге – 30 – 35 В. Наплавку порошковой проволокой проводили путем формирования наплавочного слоя в одном направлении.

В качестве дополнительной упрочняющей поверхностной обработки наплавленного слоя

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ Кемеровской области в рамках научного проекта № 18-48-420001 p_a и 16-32-60048 мол_a_дк.

Т а б л и ц а 1

Элементный состав стали марки Hardox 450

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	P	S	Fe
Содержание, % (по массе)	0,19 – 0,26	0,70	1,60	0,25	0,25	0,25	0,004	0,025	0,010	Остальное

Т а б л и ц а 2

Химический состав порошковой проволоки Fe – C – Ni – B

Элемент	C	Mn	Si	Cr	Nb	W	Ni	B	V
Содержание, % (по массе)	0,7	2,0	1,0	0	0	0	2,0	6,5	0

использована обработка интенсивными электронными пучками (электронно-пучковая обработка) для высокоскоростного плавления поверхностного слоя. Режим работы источника электронов: на первом этапе плотность энергии пучка электронов в импульсе 30 Дж/см², длительность импульсов 200 мкс, количество импульсов 20, на втором этапе плотность энергии в импульсе 30 Дж/см², длительность импульсов 50 мкс, количество импульсов 1. Режимы облучения были выбраны по результатам расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при одноимпульсном облучении [7 – 12].

Структуру объема модифицированного слоя анализировали методом поперечного шлифа, для чего образцы разрезали на две части перпендикулярно поверхности модифицирования. Химическое травление шлифов наплавки проводили 3 %-ым спиртовым раствором азотной кислоты. Исследование фазового состава и дефектной субструктуры рельсов осуществляли методами дифракционной электронной микроскопии [13, 14]. Фольги для дифракционной просвечивающей электронной микроскопии готовили путем одностороннего электролитического утонения пластинок толщиной примерно 300 мкм, вырезанных электроискровым методом из образца.

Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEMTribometerHighTemperatureS/N 07-142» (CSEMinstruments); контртелом являлся шарик диам. 4 мм из твердого сплава ВК6. Исследования микротвердости материалов осуществляли на микротвердомере HVS1000, оснащенный автоматическими устройствами приложения

нагрузки и сохранения изображений полученных отпечатков на компьютере.

Наплавленный слой формировали за один проход. Проанализировав механические и трибологические свойства, можно отметить, что наплавка, созданная на поверхности стали при одном проходе, приводит к формированию высокопрочного слоя толщиной не менее 7 мм, микротвердость которого изменяется в пределах 10,5 – 12,5 ГПа. Следовательно, твердость наплавленного при одном проходе слоя более, чем в два раза превышает твердость металла основы. При большем удалении от поверхности наплавленного слоя микротвердость материала быстро снижается, выходя на уровень приблизительно 5 ГПа (рис. 1).

В результате выполненных трибологических испытаний установлено, что наплавленный слой обладает высокой износостойкостью, превышающей износостойкость исходной стали примерно в два раза; коэффициент трения наплавленного слоя примерно в 2,2 раза ниже коэффициента трения стали в исходном состоянии.

Ниже приведены результаты трибологических испытаний наплавки проволокой Fe – C – Ni – B (v – скорость износа (параметр, характеризующий степень изнашивания материала при испытаниях); $\langle \mu \rangle$ – среднее значение коэффициента трения):

Материал	$v \cdot 10^{-6}$, мм ³ /(Н·м)	$\langle \mu \rangle$
Сталь Hardox 450	95,1	0,259
Наплавка одинарная	40,0	0,117

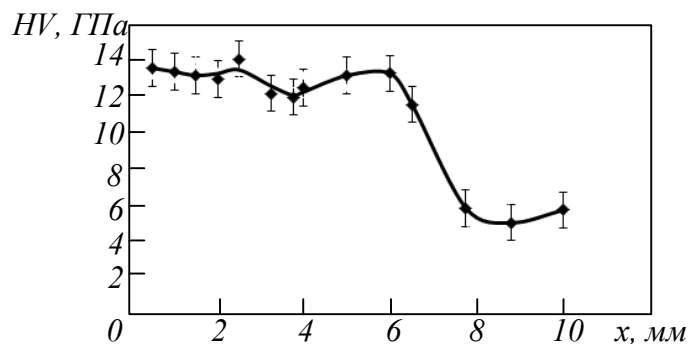


Рис. 1. Профиль микротвердости системы наплавка проволокой Fe – C – Ni – B – сталь Hardox 450 (подложка) по глубине x

Анализируя сведения об элементном составе электродной проволоки, можно предположить, что высокие прочностные и трибологические свойства наплавленного слоя обусловлены упрочнением материала боридами железа.

Исследования стали, выполненные методами дифракционной электронной микроскопии, выявили поликристаллическую (зеренную) структуру. В большинстве (0,85 – 0,90) анализируемых случаев в объеме зерен обнаружено присутствие кристаллов пластинчатой (реечной) морфологии.

Таким образом, результаты, полученные методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг, позволяют утверждать, что сталь Hardox 450 в исходном состоянии (перед созданием наплавленного электродуговым методом слоя) имеет структуру, сформировавшуюся при низкотемпературном отпуске мартенсита

пакетной морфологии. В объеме кристаллов мартенсита и на их границах, границах пакетов и зерен присутствуют наноразмерные частицы карбидной фазы (карбид железа, цементит).

Выполненные электронно-микроскопические микродифракционные исследования структуры наплавленного слоя выявили формирование эвтектики пластинчатого типа, характерное изображение которой представлено на рис. 2. Включения боридов железа бездефектны (то есть не содержат дислокационной субструктуры), что кардинально отличает их от прилегающих слоев α -фазы (рис. 2). Причиной отсутствия дислокационной субструктуры в пластинах боридов железа является их сравнительно высокая твердость (прочность). Твердость Fe_2B и FeB составляет 16,8 – 12,5 и 23,4 – 18,9 ГПа соответственно [15].

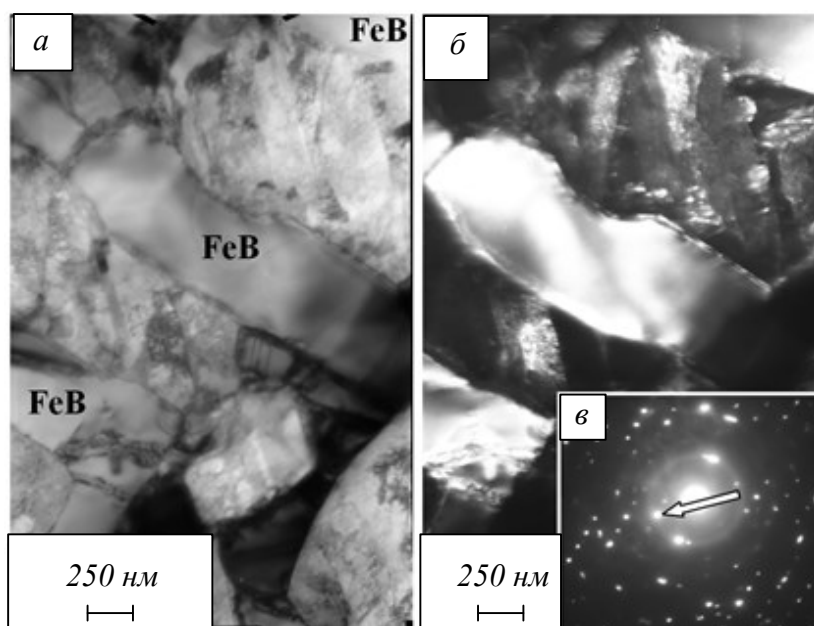


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя с боридами железа: а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексах $[103]\text{FeB} + [110]\alpha\text{-Fe}$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указаны рефлексы, в которых получено темное поле)

Для сравнения с результатами, полученными при исследовании фазового состава, дефектной субструктуры, механических свойств износостойкого слоя, наплавленного на сталь электроконтактным методом проволокой Fe – C – Ni – B, и дальнейшего повышения механических и трибологических свойств модифицированной таким образом стали было проведено высокоскоростное плавление поверхностного слоя наплавленного объема интенсивным импульсным электронным пучком (рис. 3).

Показано, что электронно-пучковая обработка поверхности наплавленного слоя 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 сравнительно высокой износостойкостью, более чем в 20 раз превышающей износостойкость стали и более чем в 11 раз превышающей износостойкость наплавленного слоя, не модифицированного электронным пучком, и сравнительно низким (приблизительно в 3,5 раза ниже коэффициента трения стали) значением коэффициента трения.

Выводы. Методами современного физического материаловедения выполнены исследования структуры, фазового состава и трибологических свойств покрытия, наплавленного на низкоуглеродистую сталь электродуговым методом в различных режимах за один проход порошковой

проволокой (Fe – C – Ni – B – W) и модифицированного путем электронно-пучковой обработки. Наплавка, созданная проволокой Fe – C – Ni – B при одном проходе, формирует высокопрочный слой толщиной примерно 7 мм с микротвердостью приблизительно 13,5 ГПа, что в два раза выше микротвердости металла основы. Износостойкость наплавленного слоя примерно в двf раз выше износостойкости исходной стали, а коэффициент трения в 2,2 раза ниже. При наплавке за один проход проволокой Fe – C – Ni – B формируется эвтектика пластинчатого типа, содержащая субмикронные бориды состава Fe_2B . Формирование закаленной ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы, высокая скалярная плотность дислокаций, которая составляет 10^{11} см^{-2} , дают дополнительный вклад в повышение механических и трибологических свойств. Модифицирование наплавленного проволокой Fe – C – Ni – B слоя импульсной электронно-пучковой обработкой выявило увеличение более чем в 20 раз износостойкости и снижение коэффициента трения в четыре раза по отношению к свойствам исходной стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полетика И.М., Макаров С.А., Тетюцкая М.В., Крылова Т.А. Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионностойких покрытий на низкоуглеродистую сталь // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 2. С. 86 – 89.

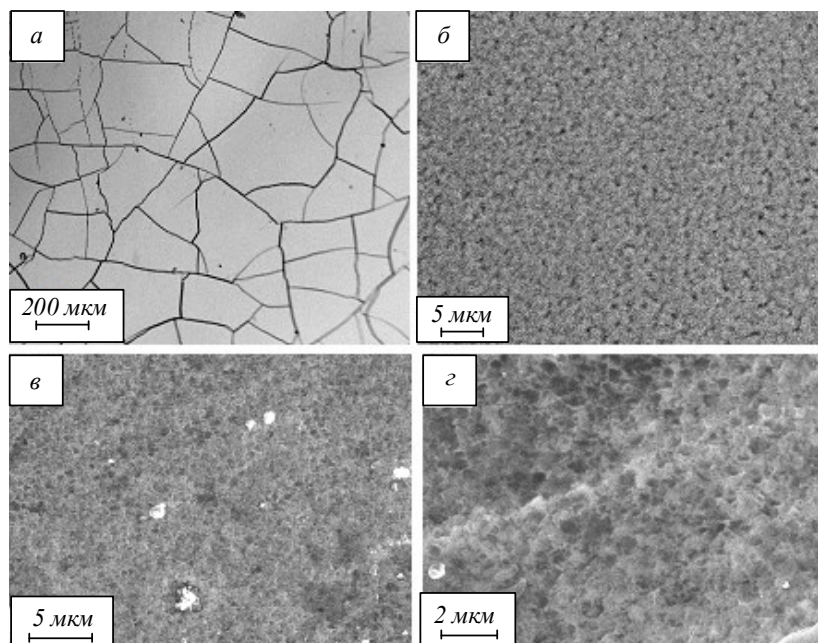


Рис. 3. Структура поверхности наплавленного слоя, облученного интенсивным импульсным электронным пучком (сканирующая электронная микроскопия)

2. Полетика И.М., Крылова Т.А., Перовская М.В. и др. Структура и механические свойства металла вневакуумной электронно-лучевой наплавки до и после термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 4. С. 44 – 53.
 3. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. 2015. № 4 (46). С. 14 – 23.
 4. 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.
 5. Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В. и др. Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // Успехи физики металлов. 2014. Т. 15. С. 211 – 232.
 6. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. – 174 с.
 7. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Konovalov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. – Cambridge international science publishing, 2015. – 272 p.
 8. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 226 с.
 9. Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Денисова Ю.А. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали. – Новокузнецк: Полиграфист, 2012. – 308 с.
 10. Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова, Т.Ю. Кобзарева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 249 с.
 11. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, Н.Н. Коваль и др. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 287 с.
 12. Денисова Ю.А. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.
 13. Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials / Kumar C.S.S.R. Ed. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
 14. Barry Carter C., David B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
 15. Кузьма Ю.Б., Чабан П.Ф. Двойные и тройные системы, содержащие бор. Справочник. – М.: Металлургия, 1990. – 317 с.
- © 2018 г. Ю.А. Рубанникова, В.Е. Кормышев,
В.Е. Громов, Д.А. Косинов, Д.А. Романов
Поступила 1 сентября 2018 г.