

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ
НАПЛАВОК НА КОНСТРУКЦИОННУЮ СТАЛЬ**

¹Кормышев В.Е., ^{2,3}Иванов Ю.Ф., ¹Громов В.Е., ¹Коновалов С.В., ^{4,5}Глезер А.М.,
¹Рубанникова Ю.А.

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

⁴Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии,
г. Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва, Россия

Проблема повышения надежности и долговечности машин и механизмов в настоящее время решается за счет целенаправленного и контролируемого изменения свойств их рабочих поверхностей. Получение покрытий с высокими эксплуатационными свойствами, обеспечивающими повышение долговечности работы изделий в экстремальных условиях высокого износа, коррозии, механических нагрузок и температур, является важной фундаментальной задачей[1]. Наиболее перспективными методами упрочнения и восстановления, позволяющими радикально улучшить свойства поверхностей, являются экономически эффективные методы наплавки, поскольку ресурс работы деталей преимущественно определяется долговечностью покрытий. Наплавка является малозатратным, но при этом высокоэффективным методом ремонта и защиты изделий. Основными факторами, определяющими их эксплуатационные свойства, являются химический и фазовый составы материала покрытия.

Цель работы: анализ структуры, механических и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой порошковой проволокой и дополнительно облученного интенсивным импульсным электронным пучком.

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450 (табл.1).

Таблица 1 – Химический состав стали Hardox 450 (вес. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe, вес. %
0,19	0,70	1,6	0,025	0,010	0,25	0,25	0,25	0,004	остальное

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 (MetalInertGas / MetalActiveGas – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом 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 (табл.2).

Таблица 2 – Химический состав порошковой проволоки (вес. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe, вес. %
0,7	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	4,5	остальное

Модифицирование наплавленного слоя осуществляли, облучая поверхность высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛО» [2] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации 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; $N=1$.

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 MICROMEASURE 3Dstation фирмы STIL. 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 FET Tecnaï 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).

Формирование наплавленного электродуговым методом слоя на поверхности стали сопровождается слабо контролируемым нагревом материала. Это приводит к протеканию процесса отпуска закаленного состояния. Отпуск стали приводит к выделению частиц карбидной фазы (цементита), расположенных в объеме пластин и на их границах. Частицы имеют игольчатую форму, характерную для цементита, образующегося при низкотемпературном отпуске закаленной стали [3].

В наплавленном слое выявлено формирование эвтектики пластинчатого типа, содержащей борид железа преимущественного состава Fe_2B (рис.1,а). В объеме и на границах пластин выявляются частицы второй фазы (рис.1,б). Микродифракционный анализ позволил выявить рефлексы, принадлежащие, преимущественно, карбиду железа (цементит).

Облучение поверхности наплавленного слоя приводит к существенному изменению фазового состава и дефектной субструктуры материала на глубину до 50 мкм. Микродифракционный анализ с привлечением темнопольной методики исследования фазового состава модифицированного слоя наплавки выявил присутствие бориды железа состава FeB карбида бора состава B_4C .

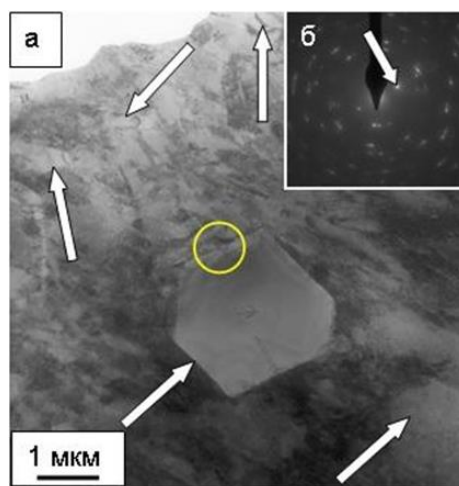


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя, расположенного на расстоянии ≈ 2 мм от поверхности облучения электронным пучком (середина наплавленного слоя). Стрелками на (а) указаны включения второй фазы; на (б) приведена микроэлектронограмма, полученная с участка фольги, обозначенного овалом на (а); стрелкой на (б) указан рефлекс $[020]Fe_2B$

Таким образом, выполненные исследования структуры и фазового состава наплавленного слоя выявили формирование многофазного состояния, характеризующегося присутствием большого количества включений боридов железа, твердость которых существенно (более чем на порядок) превышает твердость стали Хардокс-450. Очевидно, что твердость эвтектики будет отличаться от твердости боридов железа. Действительно, выполненные механические испытания материала подтвердили это предположение.

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 электронно-пучковая обработка приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной 50 мкм, основными фазами которого являются α -фаза, борид железа состава FeB и карбид бора B₄C.

Установлено, что 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. Микротвердость наплавленного слоя толщиной ~7 мкм превышает микротвердость металла основы более, чем в 2 раза.

Исследования выполнены за счет средств гранта РФФИ (проект №15-19-00065). Электронно-пучковая обработка наплавленного слоя выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №16-49-700659 p_a.).

Список литературы:

1. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Структура и свойства композиционных износостойких наплавов на сталь: монография. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 109 с.
2. 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.
3. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Козлов Э.В., Громов В.Е. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. -174 с.