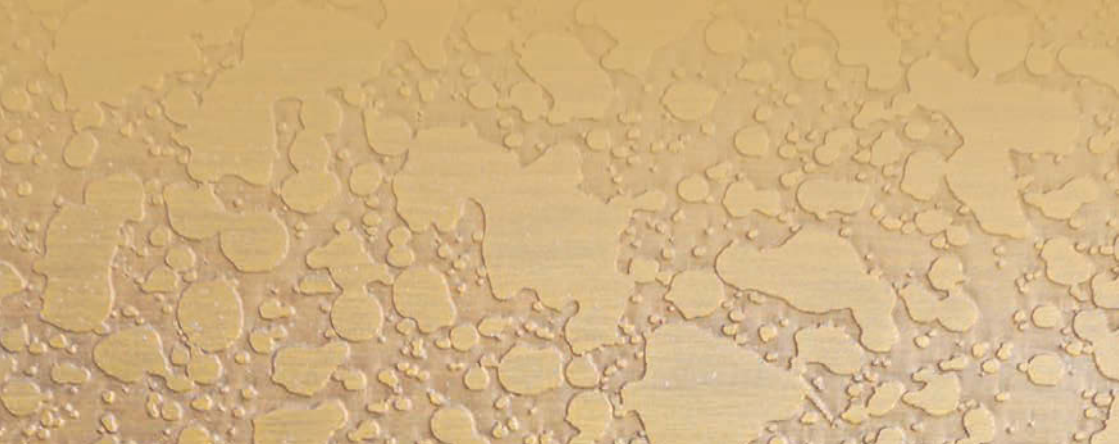




Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс

Сборник научных трудов,
посвященный 70-летию доктора технических наук,
профессора А. Н. Смирнова



Кемерово, 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс

*Сборник научных трудов,
посвященный 70-летию доктора технических наук,
профессора А. Н. Смирнова*

Кемерово 2017

УДК 620 : 621

ББК 72.4

С87

Под общей редакцией Н. В. Абабкова

Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс [Текст]: сборник научных трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А. Н. Смирнова / под общ. ред. Н. В. Абабкова; КузГТУ. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – 384 с.

ISBN 978-5-906969-43-9

Представлены научные труды известных ученых и специалистов в области физики металлов, материаловедения, технической диагностики и неразрушающего контроля металла различных промышленных объектов.

Сборник подготовлен на кафедре технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и предназначен для научных сотрудников, аспирантов и студентов технических направлений подготовки и профилей.

Научные статьи приводятся в авторской редакции. За содержание представленной в статьях информации ответственность несут авторы.

ISBN 978-5-906969-43-9

УДК 620 : 621

ББК 72.4

**© Коллектив
авторов, 2017
© КузГТУ,
2017**

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ДЕФЕКТНАЯ СУБСТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ НАПЛАВОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

В. Е. Кормышев^{1*}, инженер, **В. Е. Громов**^{1**}, д-р физ.-мат. наук, профессор,
Ю. Ф. Иванов², д-р физ.-мат. наук, профессор, **В. А. Гришунин**¹, канд. техн.
наук, доцент, **С. В. Коновалов**³, д-р техн. наук,
профессор, **Д. А. Романов**¹, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет»¹, г. Новокузнецк

ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН»², г. Томск

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева»³, г. Самара

E-mail: 89236230000@mail.ru^{*}; gromov@physics.sibsib.ru^{**}

Методами современного физического материаловедения исследована структура, фазовый состав, дефектная субструктура и трибологические свойства покрытий, сформированных на низкоуглеродистой стали Hardox 450 электродуговой наплавкой порошковыми проволоками (Fe–C–Nb–Cr–W) и (Fe–C–NiB) и модифицированных последующим облучением высокоинтенсивными импульсными электронными пучками.

В исходном состоянии сталь Hardox 450 имела структуру сформировавшегося при низкотемпературном отпуске мартенсита пакетной морфологии.

Наплавка приводит к формированию высокопрочного поверхностного слоя толщиной не менее 6 мм, микротвердость которого составляет ~10,5–12,5 ГПа, что в 2 раза превышает микротвердость основы. Вдоль границы раздела наплавка/сталь формируется структура, размер зерен которой изменяется в пределах 30–50 мкм. При удалении от границы раздела в объеме стали размер зерен снижается и на расстоянии 1,0–1,2 мм составляет 5–7 мкм.

В объеме кристаллов мартенсита наблюдается дислокационная субструктура в виде многослойных сеток, скалярная плотность дислокаций которой $\approx 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Показано, что повышенные эксплуатационные свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры α -фазы и включений боридов железа и карбидов на основе Fe, Cr, W, Nb и В.

На поверхности наплавленного слоя в результате облучения интенсивным импульсным электронным пучком формируется структура ячеистого типа. Размеры ячеек изменяются в пределах от 20 до 100 мкм. Ячей-

ки разделены протяженными прослойками. Ячейки имеют субмикронанокристаллическую структуру, характерные размеры элементов которой изменяются в пределах от 100 нм до 1 мкм. Установлено, что модифицирование поверхности наплавленного слоя облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается существенным уменьшением размеров зерен и частиц боридной и карбидной фаз, а также изменением их морфологии.

Ключевые слова: структура, фазовый состав, наплавка, износостойкость, электронно-пучковая обработка, микротвердость.

Введение

Для повышения эксплуатационных свойств поверхностных слоев металлических изделий и конструкций используются различные виды концентрированных потоков энергии. В настоящее время применяют широкий спектр упрочняющих технологий. Это позволяет выбирать ту технологию, которая в наибольшей степени подходит для определенных деталей и конструкций и условий их эксплуатации. Для правильного выбора метода упрочнения необходимо четко представлять, как реализуется выбранная технология, и проводить сравнительный анализ технологий.

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, характеризующихся повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред и циклическим воздействием, является фундаментальной задачей. В развитых странах данную задачу решают путем разработки и использования в технологиях новых наплавочных материалов, содержащих химические соединения, твердые сплавы, твердые растворы; новых источников импульсной энергии; новых систем программного проектирования, устройств диагностики адаптивного управления, обеспечивающих поиск оптимальных технологических режимов, их контроль и стабилизацию. Главным фактором, определяющим упрочнение, является выбранный материал покрытия, отличающийся от основного материала детали и обеспечивающий требуемые свойства поверхности. Для обоснованного выбора материала наплавки, соответствующего условиям его эксплуатации, необходимо проведение подробных исследований структуры, фазового состава, механических и трибологических свойств. Качество поверхности наплавки и улучшения ее трибологических и механических свойств может быть достигнуто последующей электронно-пучковой обработкой [1; 2; 4; 5; 7; 8; 11; 12; 15; 17; 18].

При научно-обоснованном практическом использовании различных видов наплавки в изделиях ответственного назначения необходим тща-

тельный анализ соотношения «параметры износа – твердость – микроструктура». Только в этом случае возможно получить изделия с высокими эксплуатационными параметрами.

Одним из путей дальнейшего улучшения свойств покрытий, наплавленных электродуговым способом, может служить наноструктуризация путем переплавления низкоэнергетическими импульсными электронными пучками, которые обеспечивают сверхвысокие (до 10^8 к/с) скорости нагрева, плавления и последующей кристаллизации.

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, трибологических и механических свойств покрытий, наплавленных на износостойкую сталь Hardox 450 электродуговым методом порошковыми (Fe–C–Nb–Cr–W) и (Fe–C–Ni–B) проволоками различного химического состава и модифицированных электронно-пучковой обработкой и установление природы упрочнения поверхности комбинированным методом.

Материал и методы исследования

Использованная сталь Hardox 450, элементный состав которой приведен в табл. 1, характеризуется низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего она хорошо сваривается и обрабатывается.

Таблица 1

Химический состав стали Hardox 450 (вес. %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	P	S	Fe
0,29	0,70	1,60	0,25	0,25	0,25	0,004	0,025	0,010	Остальное

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, в том числе абразивному износу в условиях ударных нагрузок. Для исследований были выбраны три порошковые проволоки, химический состав которых приведен в табл. 2.

Формирование наплавленного слоя на поверхность стали осуществляли в среде защитного газа состава 98 % Ar, 2 % CO₂, сварочный ток находился в пределах 250–300 А, а напряжение на дуге – 30–35 В для первых двух проволок и 350–400 А и U = 40–45 В – для третьей проволоки. Наплавку порошковыми проволоками проводили двумя способами: путем формирования наплавочного слоя в одном направлении и путем проведе-

ния перекрестной наплавки (сначала происходило формирование одинарной наплавки, а затем формировался перпендикулярный слой).

Таблица 2

**Химический состав порошковых проволок
(вес. %, остальное Fe)**

Обозначение проволоки	Химический состав								
	C	Mn	Si	Cr	Nb	W	Ni	B	V
Fe–C–Nb–Cr–W SK 258 NbC-G	1,3	0,9	1,1	7,0	8,5	1,4	0,0	0,0	0,0
Fe–C–Ni–B DT-DUR 720	0,7	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	4,5	0,0
Fe–C–Nb–Cr–W DT-DUR 760	1,4	0,0	0,0	7,0	8,0	1,2	0,0	0,0	1,0

В качестве дополнительной упрочняющей поверхностной обработки использована обработка интенсивными электронными пучками (электронно-пучковая обработка) для высокоскоростного плавления поверхностного наплавленного слоя. Данная обработка была выполнена на установке СОЛО (Институт сильноточной электроники СО РАН), имеющей электронный источник, образующий электронный пучок диаметром до 30 мм, длительность импульсов 0,03–0,20 мс, плотность энергии до 100 Дж/см², энергия электронов 5–25 кэВ. 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 была 30 Дж/см²; длительность импульсов 50 мкс; количество импульсов 1. Режимы облучения были выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при однопериодном облучении.

Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», GSEM Instruments; контртело – шарик диаметром 2 мм из твердого сплава BK6, скорость износа оценивали по площади поперечного сечения трека износа, используя 3D-профилометр MICROMEASURE 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, FET Tecnaï 2062 TWIN) электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микрорент-

геноспектрального анализа (микроанализатор EDAXECONIV, являющийся приставкой к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips»). Анализ фазового состава поверхностного слоя выполняли методами дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония) и методами ПЭМ с индицированием микроэлектроннограмм [19; 20–22; 24; 26].

Результаты и их обсуждение

Результаты, полученные методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг, позволяют утверждать, что сталь Hardox 450 в исходном состоянии (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). Частицы карбидной фазы, расположенные на границах пластин, субзерен и зерен, имеют глобулярную форму; частицы, расположенные в объеме пластин α -фазы, имеют игольчатую форму. Скалярная плотность дислокаций составляет $(3\div 5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Слой, наплавленный проволокой 1

Анализ данных показывает, что в результате формирования наплавки образуется высокопрочный поверхностный слой толщиной не менее 6 мм, средняя величина микротвердости которого составляет 10,2 ГПа, что в 1,7 раза превышает микротвердость основы. Увеличение количества наплавленных слоев от одного до двух приводит лишь к некоторому увеличению (с 6,5 до 7,5 мм) толщины упрочненного слоя; величина твердости упрочненного слоя практически не зависит от количества наплавленного металла.

Анализ структуры травленного поперечного шлифа свидетельствует об отсутствии на границе раздела «наплавка/сталь», микропор и микротрещин, которые могли бы ослабить материал и привести его к преждевременному разрушению. Вдоль границы раздела наплавка/сталь формируется структура, размер зерен которой изменяется в пределах 30–50 мкм. При удалении от границы раздела в объем стали размер зерен снижается и на расстоянии 1,0–1,2 мм составляет 5–7 мкм. В объеме кристаллов мартенсита наблюдается дислокационная субструктура в виде многослойных сеток, скалярная плотность дислокаций которой $\approx 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Высокие прочностные свойства наплавленного слоя обусловлены, с одной стороны, формированием закалочной структуры (мартенсит), а с другой – образованием включений второй фазы. Основной упрочняющей фазой наплавленного слоя независимо от количества проходов наплавочной проволоки являются частицы карбида ниобия. Размеры включений карбида ниобия изменяются в пределах от 0,2 до 1,5 мкм (рис. 1).

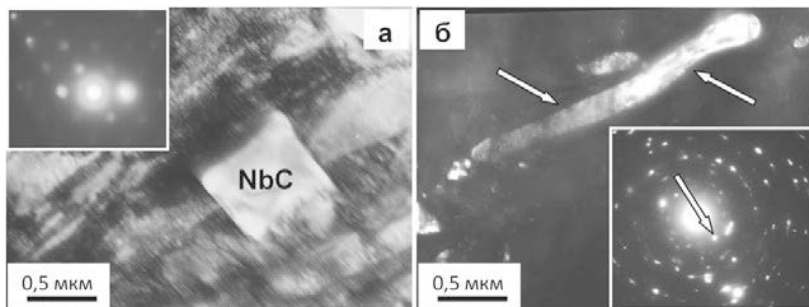


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавки с карбидами ниобия различной формы:
а – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе [002] NbC (рефлекс указан стрелкой на микроэлектроннограмме). На *б* стрелками указан карбид ниобия

В структуре переходного слоя (слой, разделяющий объем стали и наплавку) выявлено образование частиц специальных карбидов, а именно – карбидов хрома (Cr_3C_2 и Cr_7C_3), карбида сложного состава типа M_{23}C_6 ($(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$) и, весьма редко, карбида вольфрама состава WC. Частицы специальных карбидов располагаются в объеме и на границах кристаллов мартенсита, имеют округлую форму; размеры частиц изменяются в пределах от 30 до 50 нм.

Слой, наплавленный проволокой 2

Исследования механических и трибологических свойств наплавленного слоя показали, что микротвердость при одном проходе изменяется в пределах $10,5 \div 12,5$ ГПа и ≈ 15 ГПа при двойном проходе, что в 2 и 3 раза, соответственно, выше микротвердости основы. При одном проходе износостойкость в 2 раза выше, а коэффициент трения – в $\approx 2,2$ раза ниже соответствующих величин стали в исходном состоянии.

Различие в твердости наплавленных слоев обусловлено различием фазового состава одинарного и двойного слоев. При одном проходе в наплавленном слое формируется преимущественно борид железа состава Fe_2B , при двойном проходе – FeB, твердость которых различается в 1,5 раза. Дополнительно к этому повышенные механические и трибологические свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, обусловленной закалочным эффектом (формирование ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы) и наличием включений боридов железа состава Fe_2B и FeB субмикронных размеров, формирующих эвтектику пластинчатого типа. Бориды железа не содержат дислокационной субструктуры, что обусловлено, по-видимому,

их высокой твердостью (рис. 2). В α -фазе скалярная плотность дислокаций достигает 10^{11} см^{-2} .

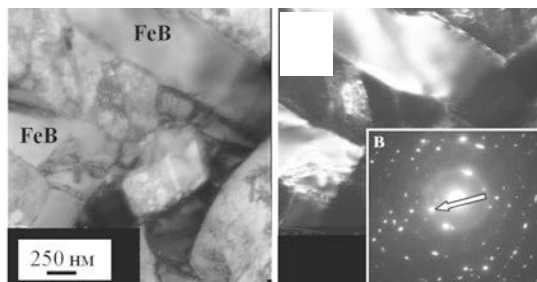


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя с бориды железа:

a – светлое поле; b – темное поле, полученное в рефлексах $[103] \text{ FeB} + [110]\alpha\text{-Fe}$; $в$ – микроэлектронограмма (стрелкой указаны рефлексы, в которых получено темное поле)

Отмечено наличие изгибных экстинкционных контуров, указывающих на формирование внутренних полей напряжений на границах раздела фаз $\text{Fe}_2\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ и $\text{Fe}_2\text{B}/\text{FeB}$. В контактом слое со стороны стали Hardox 450 выявляется субструктура пластинчатого типа со скалярной плотностью дислокаций $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В объеме и на границах пластин обнаружены частицы цементита размером 20–30 нм и бориды Fe состава FeB . Со стороны наплавки в зоне контакта формируется структура пластинчатой эвтектики $\alpha\text{-Fe} + \text{бориды Fe состава } \text{Fe}_2\text{B}$.

Слой, наплавленный проволокой 3

Более жесткие режимы наплавки привели к разному (до 140 раз) увеличению износостойкости стали Hardox 450 и снижению коэффициента трения в 2–2,5 раза. Формирование второго наплавленного слоя практически не влияет на трибологические характеристики материала.

Повышенные механические и трибологические свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и нано-размерной структуры, упрочнение которой связано с формированием мартенситной структуры α -матрицы и наличием высокой (более 50 %) объемной доли включений карбидной фазы на основе железа, хрома, вольфрама и ниобия (Me_{23}C_6 , Fe_3C , NbC , Nb_2C , Nb_6C_5 , V_8C_7 и др.) (рис. 3).

Использованные режимы наплавки приводят к заметному увеличению параметра кристаллической решетки α -фазы. Основной причиной этого может являться обогащение твердого раствора материала атомами внедрения, а именно – атомами углерода.

Структура зоны контакта металла наплавленного слоя и основного материала по многим параметрам близка к структуре исходной стали. Выявленная мартенситная структура с хаотической и клубковой дислокационной структурой со скалярной плотностью $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В объеме и на границах кристаллов мартенсита присутствуют частицы цементита.

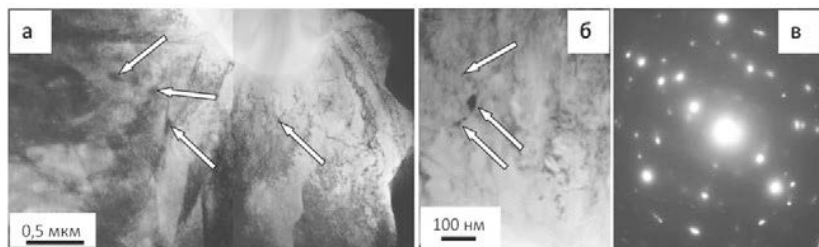


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение частиц карбида ванадия состава V_8C_7 , выявленных в наплавленном слое:
а, б – светлые поля, в – микроэлектронограмма к б. Стрелками на а и б
указаны частицы карбидной фазы

Облучение наплавленного *проволокой 1* слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к модифицированию поверхностного объема толщиной до 20 мкм. Основными фазами исследуемого поверхностного слоя наплавки являются $\alpha\text{-Fe}$ (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) и карбида Fe_3C , $\text{M}_6\text{C}(\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C})$, NbC . Обращает на себя внимание сравнительно малый параметр кристаллической решетки карбида ниобия, что может быть обусловлено высоким уровнем концентрации вакантных междоузлий, имеющих меньший линейный размер по сравнению с заполненными междоузлиями.

Анализ полученных СЭМ изображений дает основание заключить, что на поверхности наплавленного слоя в результате облучения интенсивным импульсным электронным пучком формируется структура ячеистого типа. Размеры ячеек изменяются в пределах от 20 до 100 мкм. Ячейки разделены протяженными прослойками. Ячейки имеют субмикронанокристаллическую структуру, характерные размеры элементов которой изменяются в пределах от 100 нм до 1 мкм. Включения второй фазы расположены преимущественно по границам зерен в виде протяженных прослоек, толщина которых изменяется в пределах 100–150 нм. В объеме наплавки, не модифицированной интенсивным импульсным электронным пучком, основным морфологическим типом включений являются частицы ограниченной формы, расположенные хаотически в объеме зерна. Таким образом, облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается существенным уменьшением размеров зерен (с 5–7 мкм в

наплавленном слое до 1,5–2 мкм в облученном) и частиц карбидной фазы, а также изменением морфологии частиц карбидной фазы облученного слоя. В совокупности это приводит к существенному снижению коэффициента трения наплавленного слоя, износостойкость которого более чем в 70 раз превышает износостойкость стали Hardox 450.

Коэффициент трения в процессе изнашивания имеет двухстадийный характер изменения (рис. 4). На первой стадии величина коэффициента трения составляет $\approx 0,17$, на второй стадии – $\approx 0,5$. Коэффициент трения стали без наплавки $\approx 0,26$. Анализируя изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях, можно заключить, что модифицирование наплавленного слоя интенсивным импульсным электронным пучком приводит к существенному (в ≈ 3 раза) снижению коэффициента трения.

Наплавленный проволокой 2 слой после ЭПО

Облучение наплавленного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к модифицированию поверхностного объема толщиной до 50 мкм. Обращает на себя внимание существенное уменьшение поперечных размеров кристаллов мартенсита до $50 \div 70$ нм. Если в стали, закаленной с печного нагрева, средние поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита составляют 150–200 нм, то в модифицированном интенсивным импульсным электронным пучком слое наплавки поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита изменяются в пределах 50–70 нм. Одной из причин такого изменения поперечных размеров кристаллов мартенсита может быть сверхвысокая (до 10^6 К/с) скорость охлаждения поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивным импульсным электронным пучком. Скалярная плотность дислокаций весьма высока и находится на уровне 10^{11} см⁻². Кристаллы мартенсита фрагментированы, т. е. разделены на слабоориентированные области, размеры которых изменяются в пределах от 30 до 100 нм. Объемная доля α -фазы в поверхностном слое после ЭПО составляет 0,59, остальные – включения вторых фаз – FeV и V₄C (рис. 5) разнообразной формы с размерами до 1 мкм.

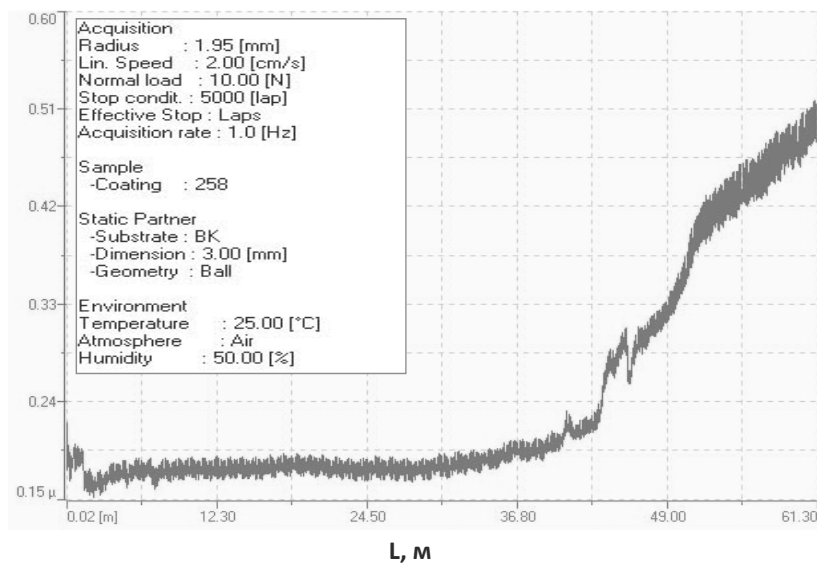


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения μ от длины трека L трибологических испытаний. На вставке приведены условия проведения трибологических испытаний

Сформированная облучением интенсивным импульсным электронным пучком структура наплавки характеризуется сравнительно 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.

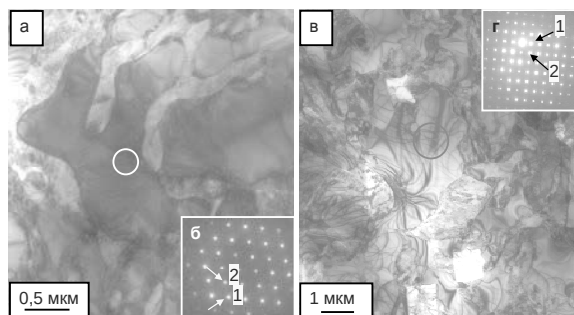


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности наплавленного слоя, облученного интенсивным импульсным электронным пучком:
а, в – светлые поля, *б, г* – микроэлектроннограммы, полученные с областей, выделенных на *а* и *в* окружностями. Стрелками на *б* указаны рефлексy фазы FeB: 1 – [011]; 2 – [111]; на *г* указаны рефлексy фазы V_4C : 1 – [012]; 2 – [110]

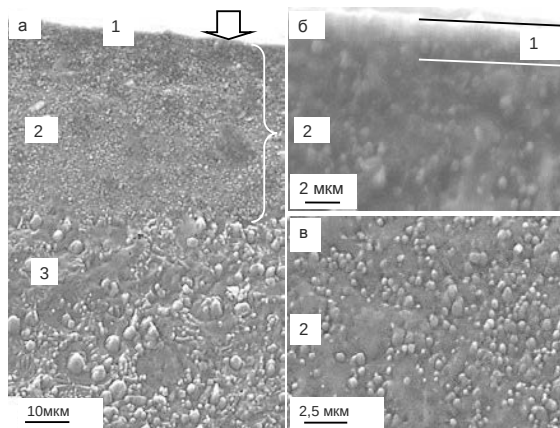


Рис. 6. Структура поперечного сечения наплавленного на сталь слоя, подвергнутого облучению интенсивным импульсным электронным пучком:
на *а* обозначено: 1 – поверхностный слой; 2 – переходный слой; 3 – основной объем наплавленного металла; фигурной скобкой выделен слой, модифицированный интенсивным импульсным электронным пучком; *б* – увеличенное изображение структуры слоя 1; *в* – увеличенное изображение структуры слоя 2

Поверхностный слой наплавки, модифицированный интенсивным импульсным электронным пучком, является многофазным агрегатом, основными фазами которого являются твердые растворы на основе α - и γ -железа, а также карбиды состава $M_{23}C_6$ и NbC. В отдельных случаях на микроэлектронограммах, полученных с карбидной фазы, выявляются рефлексы, принадлежащие кристаллическим решеткам карбида ниобия состава Nb₂C и карбида хрома состава Cr₇C₃. Различия облученного и необлученного слоев состоят в том, что, во-первых, в облученном электронным пучком слое частицы карбидной фазы существенно мельче. Во-вторых, количество частиц на единицу площади поверхности фольги в облученном материале выше. В-третьих, форма частиц карбидов в облученном слое более разнообразная, а именно – существенно меньше частиц правильной геометрической формы.

Слой наплавленного металла, подвергнутый облучению интенсивным импульсным электронным пучком, находится в упруго-напряженном состоянии, о чем свидетельствуют многочисленные изгибные экстинкционные контуры, присутствующие в выделениях карбидной фазы. Выявлено увеличение износостойкости наплавленного слоя, модифицированного интенсивным импульсным электронным пучком, более чем в 30 раз по отношению к износостойкости стали и снижения коэффициента трения в 2 раза.

Заключение

Методами современного физического материаловедения выполнены исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств покрытий, наплавленных на низкоуглеродистую сталь электродуговым методом в различных режимах за один и два прохода порошковыми (Fe–C–Nb–Cr–W) и (Fe–C–Ni–B) проволоками различного химического состава и модифицированных электронно-пучковой обработкой [3; 6; 9; 10; 13; 14; 16; 23; 25].

1. Электродуговая наплавка (Fe–C–Cr–Nb–W) проволокой формирует независимо от количества проходов градиентную структуру, заключающуюся в закономерном изменении микротвердости, фазового состава и дефектной субструктуры модифицированного слоя материала. Микротвердость наплавленного слоя $\sim$ в 2 раза превышает микротвердость металла основы; износостойкость наплавленного металла превышает износостойкость стали Hardox 450 $\sim$ в 140 раз, при снижении коэффициента трения – $\sim$ в 2–2,5 раза.

2. Повышенные физико-механические свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой связано с наличием в мартенсите α -матрицы высокой объемной доли ($\approx 0,6$) включений карбидной фазы на основе железа, хрома, вольфрама и ниобия.

3. Наплавка, созданная (Fe–C–Ni–B) проволокой, формирует высокопрочный слой толщиной ≈ 7 мм с микротвердостью 10,5–12,5 ГПа при одном проходе и толщиной 10 мм с микротвердостью ≈ 15 ГПа при двойном, что в 2 и 3 раза соответственно выше микротвердости металла основы. Износостойкость наплавленного слоя ≈ 2 раза выше износостойкости исходной стали, а коэффициент трения – в 2,2 раза ниже.

4. При наплавке за один проход (Fe–C–Ni–B) проволокой формируется эвтектика пластинчатого типа, содержащая субмикронные бориды состава Fe_2B , а при двойном наплавленном слое – FeB. Формирование закаленной ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы, высокая скалярная плотность дислокаций ($\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$), наличие большого количества изгибных экстинкционных контуров дают дополнительный вклад в повышенные механические и трибологические свойства.

5. Электронно-пучковая обработка слоя наплавленного (Fe–C–Cr–Nb–W) проволокой, сопровождается: существенным уменьшением размеров зерен и частиц карбидных фаз, увеличением плотности включений карбидной фазы, изменением их морфологии. В совокупности это приводит к снижению коэффициента трения наплавленного слоя в зависимости от режима наплавки в $2 \div 3$ раза и увеличению износостойкости в $30 \div 70$ раз по отношению к износостойкости стали Hardox 450.

6. Модифицирование наплавленного (Fe–C–Ni–B) проволокой слоя импульсной электронно-пучковой обработкой выявило увеличение более чем в 20 раз износостойкости и снижение коэффициента трения в 4 раза по отношению к исходной стали. Основными фазами поверхности наплавки является ультрамелкая дисперсная мартенситная структура α -фазы, карбобориды железа $\text{Fe}_3(\text{B}_{0.7}\text{C}_{0.3})$ и борид железа состава FeB_2 . Наплавленный слой состоит из фрагментированной (размеры фрагментов 30–10 нм) закаленной мартенситной структуры α -фазы с высокой скалярной плотностью сетчатой дислокационной субструктуры $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$, высокопрочных боридов железа состава FeB и карбида бора состава B_4C . Такое высокодефектное многофазное состояние определяет высокий комплекс физикомеханических свойств слоя после электронно-пучковой обработки.

Список литературы

1. Износостойкость и структурно-фазовые состояния поверхности наплавки, сформированной на стали сварочным методом / С. В. Райков, К. В. Соснин, Е. В. Капралов и др. // Технология металлов. 2014. № 10. С. 35–40.
2. Модифицирование электронно-пучковой обработкой наплавленного износостойкого покрытия / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Е. В. Капралов, С. В. Райков // Фундам. проблемы современ. материаловедения. 2014. Т. 11, № 4. С. 515–521.

3. Модифицирование электронным пучком борированного слоя, сформированного на стали Hardox-450 порошковой проволокой / В. Е. Кормышев, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13. № 3. С. 382–387.
4. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой / Е. В. Капралов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов // Изв. вуз. Физика. 2015. Т. 58, № 4. С. 39–45.
5. Повышение износостойкости стали наплавкой / Е. В. Капралов, С. В. Райков, Е. А. Будовских и др. // Сталь. 2014. № 7. С. 86–88.
6. Повышение свойств поверхности стали наплавкой и последующей электронно-пучковой обработкой / В. Е. Кормышев, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 1. С. 19–25.
7. Структура и свойства износостойкой наплавки на сталь Хардокс 400 / Е. В. Капралов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 1. С. 80–86.
8. Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками / В. Е. Громов, Е. В. Капралов, С. В. Райков и др. // Успехи физики металлов. 2014. Т. 15. С. 211–232.
9. Структура и свойства поверхности слоя, наплавленного на низкоуглеродистую сталь и модифицированного электронно-пучковой обработкой / В. Е. Громов, В. Е. Кормышев, А. М. Глезер и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14, № 1. С. 124–129.
10. Структура и трибологические свойства поверхностного слоя, наплавленного на мартенситную сталь и модифицированного электронно-пучковой обработкой / В. Е. Громов, В. Е. Кормышев, С. В. Коновалов и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14, № 1. С. 28–33.
11. Структура, фазовый состав и свойства наплавки, сформированной на стали электродуговым методом / Е. В. Капралов, С. В. Райков, Е. А. Будовских и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11, № 3. С. 334–339.
12. Строение по глубине износостойкого покрытия, полученного электродуговым методом на стали / С. В. Райков, Е. В. Капралов, Ю. Ф. Иванов и др. // Изв. вуз. Чер. металлургия. 2015. № 2. С. 121–126.
13. Структурно-фазовое состояние и свойства борированного слоя, сформированного на стали электродуговым методом / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Кормышев, В. Е. Громов и др. // Перспективные материалы. 2016. № 12. С. 52–57.
14. Структурно-фазовые состояния и свойства композиционных покрытий, наплавленных на сталь электродуговым методом / Е. В. Капра-

лов, В. Е. Кормышев, В. Е. Громов и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 2. С. 64–71.

15. Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками / Е. В. Капралов, С. В. Райков, Е. А. Будовских и др. // Изв. Рос. акад. наук. Сер. Физ. 2014. Т. 78, № 10. С. 1266–1272.

16. Фазовый состав и дефектная субструктура двойной наплавки, сформированной C–V–Cr–Nb–W порошковой проволокой на стали Hardox 450 / С. В. Коновалов, В. Е. Кормышев, В. Е. Громов и др. // Перспективные материалы. 2016. № 8. С. 57–62.

17. Фазовый состав и свойства наплавки, сформированной на стали электродуговым методом / С. В. Райков, Е. В. Капралов, Е. С. Ващук и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 2(122). С. 40–42.

18. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали / Е. В. Капралов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов и др. // Наноинженерия. 2015. № 4(46). С. 14–23.

19. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.

20. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.

21. Fultz B., Howe J. Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials, fourth edition. Berlin: Springer, 2013. 764 p.

22. Jian Min Zuo, John C.H. Spence, Advanced Transmission Electron Microscopy, Springer. N. Y., 2017. 729 p.

23. Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V–Cr–Nb–W powder wire on steel / S. V. Konovalov, V. E. Kormyshev, V. E. Gromov et al. // Inorganic materials: Applied research. 2017. Vol. 8, № 2. p. 313–317.

24. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. N. Y.: Springer, 2014. 770 p.

25. Electron-Beam Modification of a Surface Layer Deposited on Low-Carbon Steel by Means of Arc Spraying / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, A. M. Glezer et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. Vol. 81, № 11. p. 1353–1359.

26. Thomas J., Gemming T. Analytical Transmission Electron Microscopy. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. 348 p.