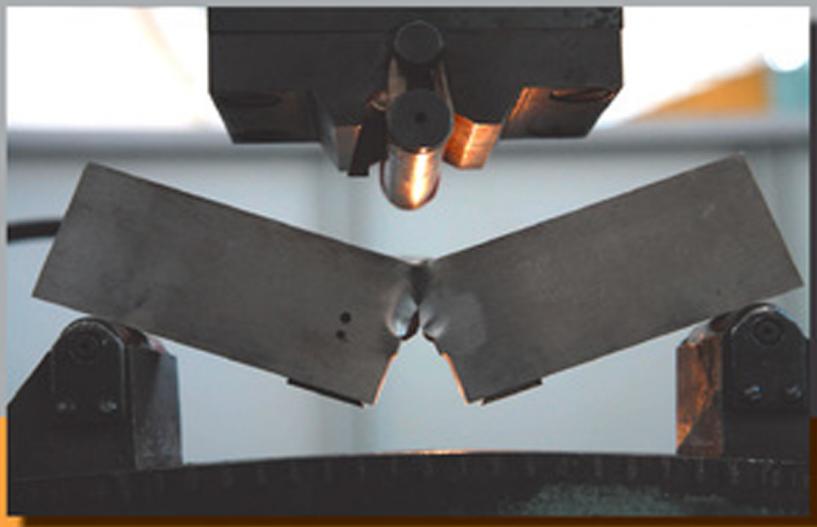


ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Под редакцией В. Е. Громова



УДК 669.017

ББК 34.431

П84

Авторы:

*К. В. Аксёнова, Л. П. Бащенко, В. Е. Громов, В. И. Данилов,
Д. В. Загуляев, Ю. Ф. Иванов, Ф. И. Иванов, И. А. Комиссарова,
С. В. Коновалов, Е. В. Мартусевич, С. В. Московский,
С. А. Невский, О. А. Перегудов, Ю. А. Рубанникова, Д. А. Романов,
В. Д. Сарычев, В. П. Сергеев, В. А. Федоров*

Рецензенты:

*доктор технических наук, профессор В. В. Муравьев;
доктор технических наук, профессор А. Н. Смирнов*

П84 Прочность и пластичность металлов и сплавов при внешних энергетических воздействиях : монография / [К. В. Аксёнова и др.] ; под ред. В. Е. Громова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 208 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0508-9

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, посвященных выявлению на различных структурных и масштабных уровнях закономерностей влияния внешних энергетических воздействий на металлы и сплавы. Проанализированы физические механизмы влияния данных видов воздействий на физические и механические свойства. Представлены физические основы технологий создания некоторых перспективных конструкционных и функциональных металлических материалов.

Для специалистов в области физики конденсированного состояния, металловедения и термической обработки, физического материаловедения. Может быть полезно аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

УДК 669.017

ББК 34.431

ISBN 978-5-9729-0508-9

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6	
ГЛАВА 1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ		9
Введение.....	9	
Материал и методы исследования.....	10	
Результаты и их обсуждение.....	11	
Заключение	16	
Список литературы	16	
ГЛАВА 2. ПРИРОДА УПРОЧНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ.....		19
Введение.....	19	
Материал и методы исследования.....	21	
Результаты и их обсуждение.....	22	
Заключение	28	
Список литературы	29	
ГЛАВА 3. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ		32
Введение.....	32	
Материал и методы исследования.....	34	
Результаты и их обсуждение.....	38	
Основные выводы	44	
Список литературы	47	
ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО- ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ТИТАНА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ, ТОКОВОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ		50
Введение.....	50	
Материал и методы исследования.....	51	
Результаты и их обсуждение.....	52	
Заключение	61	
Список литературы	62	

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО И НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ	65
Введение.....	65
Выводы	75
Список литературы	75
ГЛАВА 6. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	78
Введение.....	78
Материал и методы исследования.....	79
Результаты и их обсуждение.....	80
Заключение	89
Список литературы	91
ГЛАВА 7. МИКРОТВЕРДОСТЬ И ПОЛЗУЧЕСТЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.....	93
Введение.....	93
Материал и методы исследования.....	94
Результаты и их обсуждение.....	94
Заключение	101
Список литературы	103
ГЛАВА 8. ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ.....	106
Введение.....	107
Материал и методы исследования.....	108
Результаты и их обсуждение.....	109
Заключение	118
Список литературы	119
ГЛАВА 9. КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ НАУГЛЕРОЖИВАНИИ И КАРБОБОРИРОВАНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО- ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ.....	122
Введение.....	122
Материал и методы исследования.....	124

Результаты и их обсуждение	126
Основные выводы	133
Список литературы	133
 ГЛАВА 10. ПРИРОДА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИНВАРИАНТА АВТОВОЛН ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ	
Введение	136
Основные представления и экспериментальные данные	139
Обсуждение результатов	146
Заключение	148
Список литературы	149
 ГЛАВА 11. СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ β -PbN ₆	
Введение	151
Методика спектрофотометрических измерений и спектры поглощения НК β -PbN ₆	152
Список литературы	165
 Глава 12. МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	
Введение	167
Методика экспериментов	167
Выводы	180
Список литературы	180
 ГЛАВА 13. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ЭЛЕМЕНТАХ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	
Повышение термоциклической стойкости многослойных теплозащитных покрытий на основе Zr-Y-O / Si-Al-N	183
Повышение износостойкости экспериментальных образцов электроконтактных пар трения при обработке пучками ионов N+ и нанесении нанокомпозитных покрытий Cu-Mo-S	189
Оптически прозрачные металло-керамические защитные покрытия на стеклах иллюминаторов космических аппаратов	197
Заключение	201
Список литературы	203

ГЛАВА 1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

Резюме. Методами современного физического материаловедения проведено исследование структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств В, Cr и Nb содержащих покрытий, наплавленных на низкоуглеродистые стали Хардокс 400 и Хардокс 450 электродуговым методом. Установлены механизмы упрочнения за счет образования субмикро и наноразмерной структуры, содержащей карбиды, карбобориды и бориды.

Введение

Один из наиболее эффективных и экономичных методов защиты поверхности – это электродуговая наплавка, позволяющая обеспечить оптимальное соотношение свойств поверхности и объема материала. Она применяется не только для ремонта изношенных элементов конструкций, но и для придания особых свойств поверхностям новых изделий перед вводом их в эксплуатацию [1–5].

В последние годы получили развитие научные исследования и практические разработки в области наплавки композиционных покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых и высокомодульных фаз. Такие покрытия эффективно работают в условиях сильного абразивного изнашивания и применяются в различных областях промышленности (строительной, металлургической, горнодобывающей и др.). В этом случае основными факторами, обеспечивающими упрочнение, является выбранный материал наплавочного покрытия.

Из-за износа и коррозии деталей и конструкций ежегодные убытки в промышленности всех стран мира составляют миллиарды долларов, поскольку при остановках производства, связанных с ремонтом, выпуск продукции снижается. По данным фирмы «Eutectic + Castolin» (Швейцария) стоимость ежегодных простоев в промышленности равна около 15 % общих годовых затрат; 80 % общего времени простоев составляют потери рабочего времени вследствие поломок оборудования. Борьба с изнашиванием и коррозией осложнена тем, что использование объемно-легированных материалов, явившееся до последнего времени основным способом решения этой задачи, становится все более проблематичным из-за истощения запасов легирующих элементов и значительного увеличения их стоимости.

Интенсификация технологических процессов добычи полезных ископаемых предъявляет повышенные требования к комплексу механических свойств

рабочих поверхностей оборудования, используемого на предприятиях горно-металлургического комплекса. Наиболее остро эта проблема стоит для крупногабаритных деталей и конструкций, таких, например, как ковши экскаваторов, кузова самосвалов и других, поэтому исследования в этой области являются актуальными как в научном, так и в практическом плане. В последние годы получили развитие исследования в области наплавки композиционных покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых и высоко-модульных фаз. Основными факторами, определяющими их эксплуатационные свойства, являются химический и фазовый составы материала покрытия. Для обоснованного выбора материала покрытий, соответствующих условиям их эксплуатации, необходимо проведение подробных исследований их свойств и структуры.

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ структурно-фазовых состояний и выявление природы высоких физико-механических свойств покрытий, наплавленных на износостойкие стали Хардокс 400 и Хардокс 450 электродуговым методом порошковыми проволоками различного химического состава.

Материал и методы исследования

Стали Хардокс 400 и Хардокс 450, элементный состав которых приведен в таблице 1.1, характеризуются низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего она 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.

Таблица 1.1

Химический состав используемых материалов (Fe – остальное)

Материал подложки и порошковая проволока	Содержание элементов, % (по массе)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Nb
Сталь Хардокс 400	0,18	0,70	1,60	0,025	0,01	1,0	0,25	0,25	–	–
Сталь Хардокс 450	0,19–0,26	0,70	1,6	0,025	0,01	0,25	0,25	0,25	0,004	–
Борсодержащие покрытие 1	0,70	1,0	2,0	–	–	0,0	2,0	–	6,5	–
Ниобий и хром содержащее покрытие 2	2,06	0,65	2,51	0,03	–	13,48	–	–	–	6,36

На поверхности сталей методом электродуговой наплавки формировали покрытия толщиной до 7 мм (покрытие 1 на стали Хардокс 450, покрытие 2 на стали Хардокс 400). Наплавку проводили в среде защитного газа состава 98 % Ar, 2 % CO₂ при сварочном токе 250–300 А и напряжении на дуге 30–35 В.

Металлографические исследования, выполнены на оптическом микроскопе Olimpus GX 71, оснащенном цифровой камерой B370 с программным обеспечением Image Scopem. Дефектную структуру анализировали методами просвечивающей электронной микроскопии ПЭМ тонких фольг и реплик и СЭМ. Микротвердость измеряли на приборе HVS – 1000 А с цифровым дисплеем. Трибологические свойства изучали в геометрии диск-штифт с помощью трибометра CSEM при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

Покрытие 1 на сталь Хардокс 450

На рисунке 1.1 представлено распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя. Видно, что микротвердость немонотонно изменяется по сечению наплавки, в 2,7 раза превышая микротвердость основного материала.

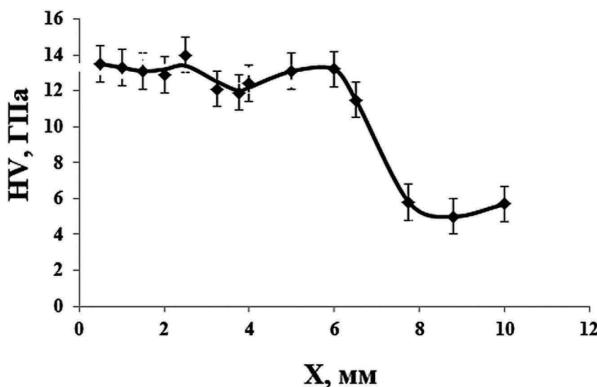


Рис. 1.1. Профиль микротвердости системы «наплавка проволокой 1 / (сталь Хардокс 450) подложка»

Формирование покрытия приводит к увеличению износостойкости поверхности ~в 2,5 раза и снижению коэффициента трения ~в 1,3 раза по отношению к подложке. Эти значения превосходят соответствующие величины для порошковой проволоки с 3,7 % В [6–10]. Как и в этой, так и в предыдущих работах, установлено, что формирование покрытия 1 сопровождается созданием многослойной структуры, слои которой различаются морфологией элементов

субструктуры. В поверхностном слое (рисунок 1.2, *а*) толщиной 5 мм формируется столбчатая структура (рисунок 1.2, *б*), ориентированная перпендикулярно поверхности. Она представлена чередующимися областями толщиной до 10 мкм, различающимися типом субструктуры – смешанной субструктурой пластинчатого и глобулярного типа и пластинчатой (рисунок 1.2, *в*). Толщина пластинок и прослоек, их разделяющих, изменяется в пределах от 50 до 100 нм. По мере удаления от поверхности покрытия в промежуточном слое пластинчатая структура вырождается и на границе с переходным слоем исчезает (рисунок 1.2, *г*). Особенностью переходного слоя является глобулярный тип структуры (рисунок 1.2, *д*). Размеры глобул изменяются в пределах от 1,5 до 3,0 мкм. Глобулы фрагментированы на области субмикронного размера. На границе раздела с подложкой переходный слой имеет дендритную структуру. Граница раздела между покрытием и подложкой характеризуется наличием микропор и микротрещин, что указывает на присутствие в материале упругих напряжений. Зона термического влияния имеет закалочную структуру с кристаллами мартенсита пакетного и пластинчатого типов.

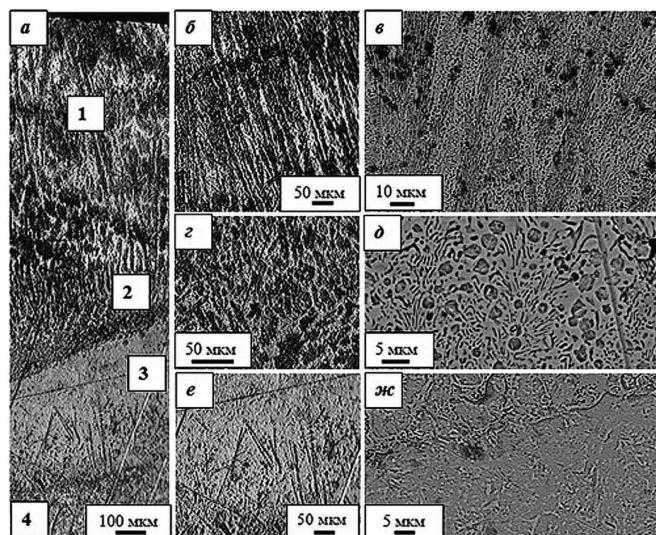


Рис. 1.2. Слоистая структура покрытия, представленная поверхностным слоем 1, промежуточным слоем 2, переходным слоем 3 и зоной термического влияния стали 4:
a, б, в, е – оптическая микроскопия; г, д, ж – СЭМ

Микрорентгеноспектральный анализ островков и прослоек, их разделяющих, позволил выявить расслоение материала наплавки 1 по углероду и карбидообразующим элементам – прослойки, разделяющие островки кристаллизации (рисунок 1.3, спектр 1), обогащены углеродом и титаном.

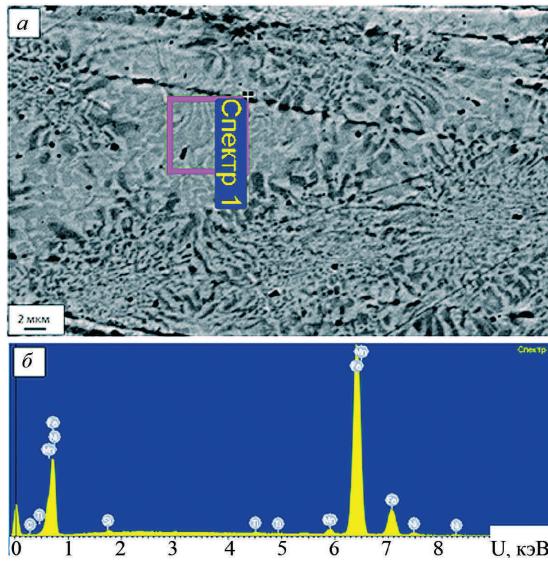


Рис. 1.3. Характерный участок структуры наплавки (а) и соответствующий ему энергетический спектр (б), полученный с области, выделенной рамкой

Дифракционные исследования морфологии и фазового состава покрытий позволяют заключить, что основной причиной кратного увеличения микротвердости и износостойкости покрытия является формирование нано- и субмикро-размерных частиц карбидных, боридных и карбоборидных фаз на основе железа (рисунки 1.4 и 1.5), содержание которых составляет 53 %.

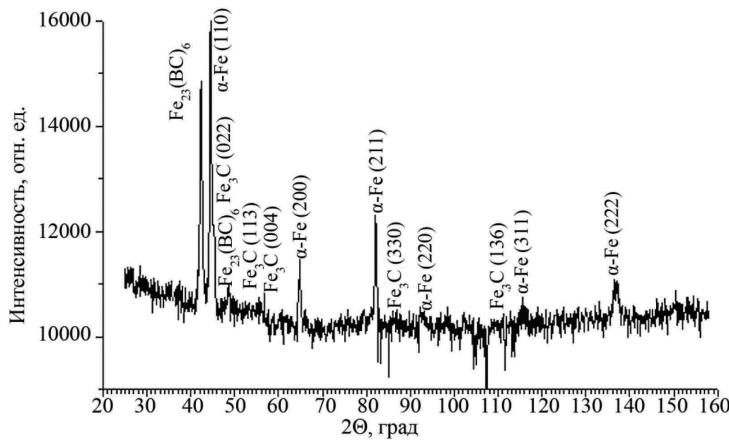


Рис. 1.4. Участок дифрактограммы наплавки порошковой проволокой 1

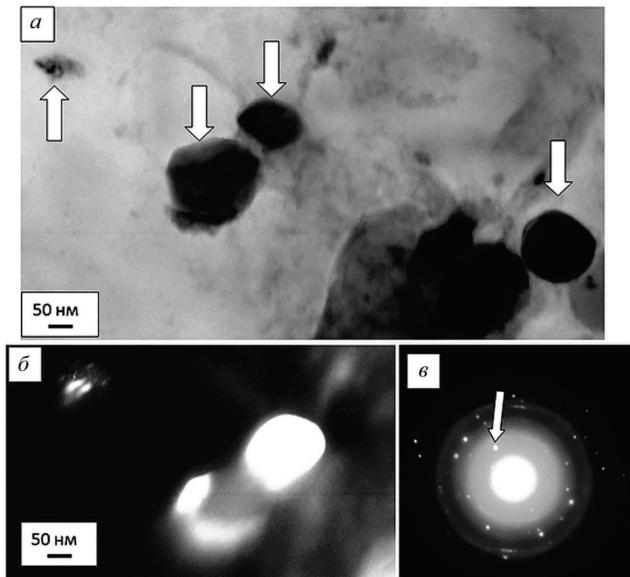


Рис. 1.5. Электронно-микроскопическое изображение частиц карбоборида железа состава $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$, формирующихся в покрытии 1:

а – светлопольное изображение; *б* – темное поле, полученное в рефлексе [331] $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$; *в* – микроэлектронограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле); на (а) стрелками указаны частицы карбоборида железа

Покрытие 2 на сталь Хардокс 400

Анализ работ [11–14] показывает, что, как и в покрытии 1, так и в покрытии 2 выявлено формирование многослойной многофазной структуры. Рентгеноструктурный анализ показал, что фазовый состав наплавки представлен зернами α -Fe и включениями карбидных фаз на основе железа, хрома и ниобия (более 38 %). В результате анализа структурно-фазового состояния покрытий, осуществленного методами электронной дифракционной микроскопии, исследовано взаимное расположение зерен α -Fe и частиц карбидных фаз. Показано, что основной карбидной фазой является цементит, располагающийся протяженными прослойками, разделяющими зерна α -Fe. Частицы карбида хрома и ниобия (рисунок 1.6) наноразмерного диапазона (80–150 нм) располагаются на межфазных границах системы (α -Fe / Fe_3C), а также в объеме зерен α -Fe.

В объеме наплавки отмечено наличие микропор и микротрешин, свидетельствующее об упруго-напряженном состоянии, их источниками могут являться включения частиц вторых фаз. В работах [6–14] приведен анализ возможных механизмов упрочнения низкоуглеродистых сталей наплавкой порошковыми проволоками различного химического состава.

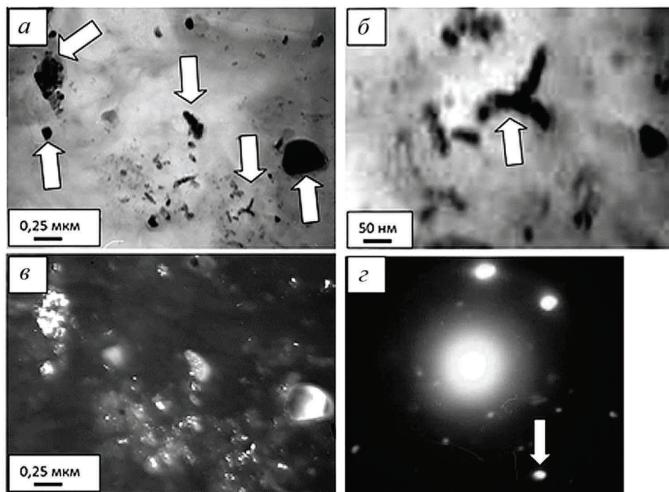


Рис. 1.6. Электронно-микроскопические изображения частиц карбида ниобия, выявленных в покрытии 2:

a, б – светлопольные изображения; в – темное поле, полученное в рефлексе [422]NbC; г – микроэлектронограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение. На (а, б) стрелками указаны частицы карбида ниобия

Выполненные количественные исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя покрытий позволяют говорить о двух основных механизмах упрочнения. Это, механизм Холла – Петча, поскольку, чем дисперснее структура, тем прочнее материал, и механизм дисперсионного твердения, обусловленный блокированием активных систем скольжения дислокаций частицами второй фазы [10–14].

На основе выполненных исследований были рассмотрены вопросы практического использования результатов исследования структурно-фазовых состояний наплавленных покрытий на стали Хардокс 400 и Хардокс 450. На ООО «Вест 2002» разработана технология футеровки рабочих поверхностей ковша в полевых условиях без снятия его с экскаватора. Применение технологии позволяет: снизить расход денежных средств на защиту ковша от изнашивания по сравнению с заводской футеровкой; сократить время межремонтного простоя экскаватора; уменьшить влияние термических и механических нагрузок на металлоконструкцию ковша; значительно снизить вероятность катастрофического разрушения износостойкой футеровки; уменьшить зависимость предприятий-заказчиков от поставки импортных комплектующих частей. В качестве рекомендации предложено проводить наплавку ковшей экскаваторов в местах наибольшего изнашивания проволокой с наибольшей износостойкостью.

Заключение

Методами современного физического материаловедения выполнены исследования структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств покрытий, наплавленных на низкоуглеродистые износостойкие стали Хардокс 400 и Хардокс 450 электродуговыми проволоками различного химического состава [6–14].

Покрытия, имеют градиентное строение, состоящее из трех слоев, которые различаются морфологией элементов субструктурь, и зоны термического влияния.

Установлено влияние химического состава использованных порошковых проволок на физико-механические свойства наплавленных покрытий. Коэффициент трения покрытий в 1,2–2,0 раза ниже, чем у стальной подложки, а износостойкость в 2,0–2,5 раза выше.

Физико-механические свойства покрытий, наплавленных 1-й порошковой проволокой, обусловлены формированием субмикро- и наноразмерной структуры, содержащей частицы карбида Fe_3C , борида FeB , карбоборида $\text{Fe}_{23}(\text{BC})_6$ и боросилицида $(\text{FeSi})_3\text{B}$ железа (всего 53 %).

Свойства покрытий, сформированных проволокой 2, обусловлены мелко-размерными частицами карбидов железа Fe_3C , ниobia NbC , Nb_2C , хрома Cr_3C_2 и Cr_7C_3 , силицида железа $\text{Fe}_3\text{Si}_{0,97}$.

Сравнительный анализ формируемых свойств и структурно-фазовых состояний наплавленных покрытий показал, что их повышенная износостойкость обусловлена проявлением двух основных механизмов упрочнения – Холла–Петча и дисперсионного твердения, то есть формированием субмикрокристаллической структуры α -фазы и выделением на стадии кристаллизации большого объема высокопрочных частиц вторых фаз.

Полученные результаты внедрены на горнодобывающих предприятиях Кемеровской области для защиты ковшей экскаваторов от абразивного изнашивания в условиях ударных нагрузок.

Список литературы

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.
2. Темляшин М. В., Вашковец В. В., Ри Х. Исследование эффективности способов легирования при электрошлаковой наплавке // Проблемы и

перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул, 2008. – С. 85–86.

3. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Селиванов Ю. В. Особенности формирования защитных коррозионностойких покрытий при импульсной электродуговой наплавке сталей аустенитного класса // Сварочное производство. – 2009. – №4. – С. 20–25.
4. Казаков Ю. Н., Даценко А. А., Петросян С. М. Механометаллургическое воздействие на геометрию и свойства поверхностей деталей при электродуговой наплавке // Сварочное производство. – 2012. – №5. – С. 16–24.
5. Еремин Е. Н., Лосев А. С. Применение боридных соединений в порошковой проволоке для наплавки мартенситно-стареющей стали // Сварочное производство. – 2011. – №10. – С. 12–15.
6. Капралов Е. В., Райков С. В., Будовских Е. А., Громов В. Е., Ващук Е. С., Иванов Ю. Ф. Структура, фазовый состав и свойства наплавки, сформированной на стали электродуговым методом // Фундам. проблемы современ. материаловедения. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 334–339.
7. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Капралов Е. В., Райков С. В. Модифицирование электронно-пучковой обработкой наплавленного износостойкого покрытия // Фундам. проблемы современ. материаловедения. – 2014. – Т. 11. – № 4. – С. 515–521.
8. 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.
9. Raikov S. V., Kapralov E. V., Ivanov Yu. F., Budovskikh E. A., Gromov V. E. Structure Gradient in Wear-Resistant Coating on Steel // Steel in Translation. –2015. – Vol. 45. – No. 2. – Pp. 120–124.
10. Капралов Е. В., Будовских Е. А., Громов В. Е., Райков С. В., Иванов Ю. Ф. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. – 2015. – № 4 (46). – С. 14–23.
11. Райков С. В., Капралов Е. В., Ващук Е. С., Будовских Е. А., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Соснин К. В. Фазовый состав и свойства наплавки, сформированной на стали электродуговым методом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 2 (122). – С. 40–42.
12. 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.

13. Raykov S. V., Kapralov E. V., Vaschuk E. S., Budovskikh E. A., Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Teresov A. D., Sosnin K. V. Structure of the Surface Layer of a Wear-Resistant Coating after Treatment with a High-Intensity Electron Beam // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – Vol. 9. – No. 5. – Pp. 934–938.
14. Popova N., Nikonenko E., Ivanov Yu., Gromov V., Budovskikh E., Rakov S., Kapralov E., Vashuk E. Structure and properties of wear-resistant weld deposit formed on martensitic steel using the electric-arc method // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1013. – Pp. 194–199.

ГЛАВА 2. ПРИРОДА УПРОЧНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Резюме. Выявлены закономерности и физическая природа модифицирования и последующей электронно-пучковой обработки титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6.

Введение

Долговечность рабочих поверхностей металлов и сплавов, главным образом, определяется качеством их защиты от износа и коррозии. Большая их часть всего за два-три года теряют до 50 % своих функциональных свойств, что приводит к значительным материальным потерям. Методы упрочнения поверхности включают в себя, с одной стороны, модифицирование (в том числе легирование) поверхностных слоев материала без изменения геометрических размеров детали, а с другой, – нанесение покрытия на поверхность детали, когда ее размеры изменяются на величину наносимого слоя покрытия. В первом случае изменяются или структура материала в поверхностном слое, или химический состав и распределение его по глубине слоя, или одновременно и то, и другое. Во втором случае главным фактором, определяющим упрочнение, является выбранный материал покрытия, отличающийся от основного материала изделия и обеспечивающий требуемые свойства поверхности. В последние десятилетия получили приоритетное развитие новые высокоэффективные методы упрочняющей обработки, использующие концентрированные потоки энергии (КПЭ). Поверхностное легирование, напыление покрытий при обработке КПЭ и наплавка приводят к многократному повышению функциональных свойств, таких как твердость, износостойкость и др. В Сибирском государственном индустриальном университете получили развитие электровзрывное легирование (ЭВЛ) и электронно-пучковая обработка (ЭПО) низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. Это локальные методы упрочнения поверхности, которые могут оказаться экономически эффективными и найти практическое применение.

В связи со сложностью физических процессов при обработке поверхности с использованием ЭВЛ, ЭПО и электродуговой наплавки возможности этих методов продолжают изучаться. Это обуславливает актуальность проведения новых исследований их практического применения для повышения функциональных свойств в том или ином конкретном случае, а также дальнейших теоретических и экспериментальных исследований механизмов упрочнения поверхностных слоев.

Модифицирование структуры и свойств поверхностных слоев материалов при ЭВЛ заключается в формировании из продуктов электрического взрыва проводников импульсной многофазной плазменной струи, оплавлении ее поверхности и насыщении расплава компонентами струи, последующей кристаллизации расплава в условиях самозакалки с образованием упрочняющих фаз. При ЭВЛ в качестве взрываемого проводника может быть использован любой электропроводный материал. В качестве легирующих добавок при ЭВЛ могут использоваться также порошки различных веществ, которые вносятся в импульсную многофазную плазменную струю, формируемую из продуктов взрыва и служащую инструментом воздействия на обрабатываемую поверхность. В результате обработки приводит к одновременному многократному повышению различных физико-механических и эксплуатационных свойств. Исследования показывают, что упрочнение обусловливается, прежде всего, мелкодисперсными включениями вторых фаз (карбидных, боридных и других), распределенными в вязкой металлической матрице. Состояние исследований в этой области характеризуется изучением особенностей тех процессов ЭВЛ (например, науглероживания и карбоборирования модельных металлов и сплавов), которые уже успешно апробированы в условиях производства при использовании других аналогичных или традиционных методов. Особенностями ЭВЛ являются его импульсный характер и неоднородность строения и структуры используемых для обработки поверхности плазменных струй. Вследствие импульсного характера обработки в зоне легирования выявляются области, характеризующиеся концентрационными неоднородностями (например, углерода или бора) и дефектами структуры (микротрещинами и микропорами). В сформированной плазменной струе конденсированные частицы продуктов взрыва и порошковых навесок располагаются в тылу струи и поэтому достигают облучаемой поверхности, когда она уже оплавлена или после ее кристаллизации. Эти частицы формируют на облучаемой поверхности развитый рельеф, что может ограничивать область практического использования ЭВЛ. Все это вызывает необходимость последующей модификации зоны обработки. Практическое применение разрядно-импульсных технологий упрочнения поверхности металлов и сплавов в настоящее время сдерживается малой изученностью характерных для них взаимосвязанных процессов вблизи облучаемой поверхности, в оплавляемой зоне легирования и в зоне термического влияния. Это относится и к ЭВЛ, что ограничивает возможности управления обработкой и оптимизации формируемых свойств. В литературе мало систематизированных сведений о тепловых, силовых и гидродинамических процессах при ЭВЛ, влиянии структуры импульсных плазменных струй на результаты обработки, металлофизических аспектах этого метода поверхностного легирования. Мало экспериментальных

данных имеется и по его практическому использованию. Это отражается на отставании в разработке специализированного оборудования с высоким уровнем механизации и автоматизации процесса обработки поверхности. Одно из направлений развития исследований в области ЭВЛ, которое стало развиваться в последние годы, – это разработка комбинированного метода упрочнения поверхности, сочетающего ЭВЛ и последующую ЭПО зоны легирования. Выявление закономерностей ЭВЛ, а также комбинированной обработки, включающей ЭВЛ и последующую ЭПО, вносит вклад в развитие теоретических представлений о поверхностном легировании с использованием КПЭ. Электронно-пучковая обработка с использованием низкоэнергетических сильноточных электронных пучков осуществляется в импульсно-периодическом режиме, что позволяет, с одной стороны, увеличить время нахождения поверхностного слоя в расплавленном состоянии и гомогенизировать его элементный состав, а с другой, – сохранить закалочные эффекты, приводящие к формированию субмикро- и наноразмерной структуры [1–5].

Целью настоящей работы является установление физической природы и выявление механизмов повышения эксплуатационных свойств сталей и сплавов при обработке поверхности импульсными плазменными струями, электронными пучками.

Материалы и методы исследований

В качестве материалов исследования использованы титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6. Легирование поверхности осуществляли на лабораторной электровзрывной установке ЭВУ 60/10. Она включает в себя емкостный накопитель энергии и плазменный ускоритель, рабочим веществом которого является материал взрываемого проводника. Обработку проводили при поглощаемой плотности мощности $5,5 \text{ ГВт}/\text{м}^2$, которая обеспечивала оплавление поверхности на максимальную глубину, насыщение расплава продуктами взрыва и частицами порошковых навесок и последующую самозакалку. При этом выплеск расплава не развивался.

Науглероживание поверхности совместно с порошковыми навесками соединений, обладающих высокими физико-механическими свойствами, а именно диборида титана TiB_2 , карбида кремния SiC и оксида циркония ZrO_2 , проводили для того, чтобы повысить ее микротвердость и износостойкость.

В качестве взрываемого проводника использовали ленту углеродную марки ЛУ-П/0,1-50 массой 140 мг. Навески порошков массой 50 мг располагали на ленте в области внутреннего электрода ускорителя. При формировании струи они захватывались ею и переносились на упрочняемую поверхность.

Электронно-пучковую обработку образцов поверхности после ЭВЛ осуществляли на установке «Соло» Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, изменяя плотность энергии пучка (45 , 50 и 60 Дж/см 2), длительность импульсов (100 и 200 мкс) и их количество (10 и 20 имп.). Частота импульсов во всех случаях составляла $0,3$ Гц.

Результаты и их обсуждение

Структура поверхности сплавов титана ВТ1-0 и ВТ6 после ЭВЛ с использованием в качестве взрываемого проводника углеродных волокон с размещенными на них навесками порошков TiB₂, SiC и ZrO₂ характеризуется развитым рельефом. Поверхность зоны легирования характеризуется наличием ряда особенностей структуры: следов течения расплава, микропор, микротрещин, частиц углеродных волокон и частиц порошков и их конгломератов (рисунок 2.1).

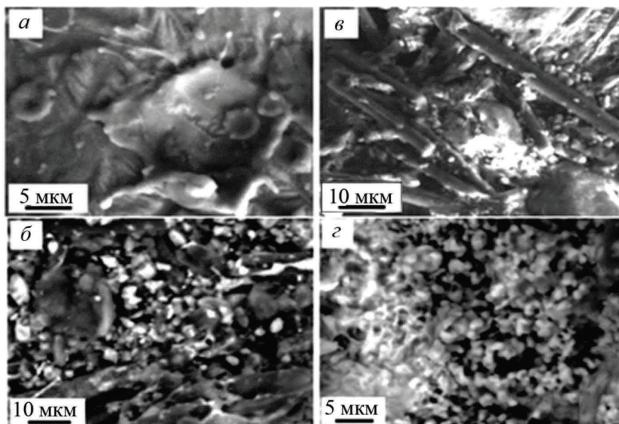


Рис. 2.1. Морфология поверхности титана после науглероживания с порошковой навеской TiB₂. РЭМ. Изображение получено во вторичных (а, в) и в обратно отраженных (б, г) электронах. $R_a = 3,4$ мкм

Поверхность обработки характеризуется неоднородным распределением легирующих элементов. Так, например, после науглероживания с использованием порошка SiC выявлены участки, обогащенные как атомами кремния, так и атомами углерода (рисунок 2.2).

Последующая ЭПО с переплавлением поверхности обработки приводит к уменьшению ее шероховатости, объединению покрытия с нижележащей зоной легирования и заlewчиванию микротрещин. Выглаживание рельефа поверхности упрочнения происходит в результате частичного испарения, действия силы поверхностного натяжения и силы отдачи паров.

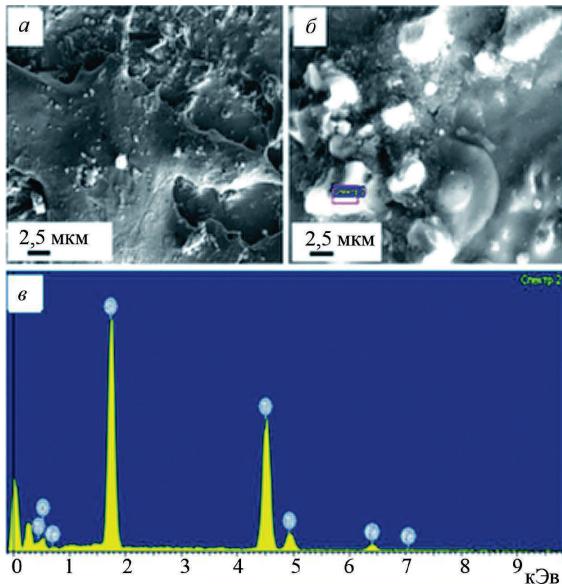


Рис. 2.2. Морфология поверхности (*а*, *б*) и энергетический спектр (*в*) образца BT1-0 после электровзрывного науглероживания с порошковой навеской SiC

По глубине образцов сплавов BT1-0 и BT6 после ЭВЛ формируется слоистая структура, представленная зоной легирования, переходным слоем и зоной термического влияния, переходящей в основной объем материала. Толщина зоны легирования вследствие высокоразвитого рельефа поверхности обработки неодинакова в различных местах, изменяется в широких пределах и достигает 65–75 мкм. По морфологическим признакам в ней выделяются два слоя: поверхностный и промежуточный. Толщина промежуточного слоя составляет 3–5 мкм.

Последующая ЭПО сопровождается снижением шероховатости поверхности обработки, которая приобретает зеркальный блеск. Обработка приводит к заlewчиванию дефектов, обусловленных попаданием в расплав частиц углеродных волокон и порошковых навесок. Микропоры и микротрешины выявляются в незначительном количестве.

Толщина зоны легирования после ЭПО изменяется в пределах 25–50 мкм и уменьшается с ростом плотности энергии пучка электронов.

Наблюдается гомогенизация элементного состава зоны легирования. Частицы углеродных волокон и порошковых навесок не выявляются. Структура кристаллизации вблизи поверхности сформирована мелкодисперсными дендритами, глобулами или имеет столбчатый характер. С глубиной степень легирования уменьшается, а структура становится более грубой.