

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ
INTERACTION OF RADIATION
WITH SOLIDS**



BITT-2019

IRS-2019

**Материалы
13-й Международной
конференции
Минск, Беларусь**

**Proceedings
of the 13th International
Conference
Minsk, Belarus**

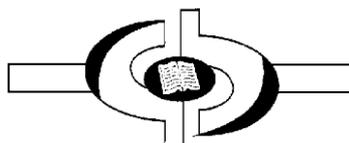
30 сентября – 3 октября 2019 г. September 30 – October 3, 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
BELARUSIAN REPUBLICAN FOUNDATION FOR FUNDAMENTAL RESEARCH



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

Материалы 13-й Международной конференции
Минск, Беларусь, 30 сентября – 3 октября 2019 г.

INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS

Proceedings of the 13th International Conference
Minsk, Belarus, September 30 – October 3, 2019

Минск
БГУ
2019

УДК/UDK 538.97-405(06)
ББК/ВБК 22.37я431
В40

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

профессор, доктор физико-математических наук *В. В. Углов* (отв. ред.);
профессор, доктор физико-математических наук *В. М. Анищук*;
член-корреспондент НАН Беларуси,
профессор, доктор физико-математических наук, *Ф. Ф. Комаров*;
профессор, доктор физико-математических наук *С. А. Максименко*;
кандидат физико-математических наук
Л. В. Баран;
доцент, кандидат физико-математических наук
Н. Н. Черенда;
доцент, кандидат физико-математических наук
И. И. Азарко

Адрес редакции: пр. Независимости, 4, к. 159,
220030 Минск, Беларусь
Телефон редакции: +375 17 209 51 34
Web site: vitt.bsu.by
E-mail: conf_vitt@bsu.by

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-chief
Vladimir V. Uglov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Full Professor
Victor M. Anishchik – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Full Professor
Fadei F. Komarov – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus; Doctor of Science (Physics and Mathematics), Full Professor
Sergei A. Maksimenko – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Full Professor
Liudmila V. Baran – Ph.D
Nikolai N. Cherenda – Ph.D, Associate Professor
Igor I. Azarko – Ph.D, Associate Professor

Address of editorial office: 4 Nezavisimosti Ave.,
Room 159, Minsk, 220030 Belarus
Phone number of editorial office:
+375 17 209 51 34
Web site: vitt.bsu.by
E-mail: conf_vitt@bsu.by

Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. / редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2019. – 566 с.

Interaction of Radiation with Solids : Proceedings of the 13th International conference, Minsk, Belarus, September 30 – October 3, 2019 / ed.: V. V. Uglov [et al.]. – Minsk : BSU, 2019. – 566 p.

Представлены доклады 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (30 сентября – 3 октября 2019 г., Минск), рассматривающие следующие темы: процессы взаимодействия излучений с твердым телом, радиационные эффекты в твердом теле, модификация свойств материалов, формирование наноматериалов и наноструктур, влияние излучений на структуру и свойства покрытий, современное оборудование для радиационных технологий.

Адресуется научным сотрудникам и студентам естественно-научных факультетов вузов.

The collection contains reports presented at 13th International conference «Interaction of radiations with solids» (September 30 – October 3, 2019, Minsk) and covering the following topics: processes of radiation and plasma interaction with solids, radiation effects in solids, modification of material properties, formation of nanomaterials and nanostructures, radiation influence on coatings structure and properties, advances in equipment and technologies.

It is addressed to researcher and students of natural-science faculties of high schools.

УДК/UDK 538.97-405(06)
ББК/ВБК 22.37я431

© БГУ/BSU, 2019

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОДНО И ДВУХКРАТНО НАПЛАВЛЕННОГО УПРОЧНЯЮЩЕГО СЛОЯ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

Ю.А. Рубанникова, В.Е. Громов, Д.А. Романов, В.Е. Кормышев, О.А. Кондратова
Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова 42, 654007 Новокузнецк, Россия, rubannikova96@mail.ru

Методами современного физического материаловедения выполнены исследования структуры, фазового состава, механических и трибологических свойств покрытий, одно- и двукратно наплавленных на мартенситную низкоуглеродистую сталь Hardox 450 (Fe-C-Ni-B) порошковой проволокой. В исходном состоянии сталь Hardox 450 имеет структуру, сформировавшуюся при низкотемпературном отпуске мартенсита пакетной морфологии. Показано, что микротвердость двойного наплавленного слоя толщиной ≈ 10 мм превышает микротвердость металла основы более чем в 3 раза. При наплавке (Fe-C-Ni-B) проволокой упрочнение обусловлено формированием субмикронных боридов состава Fe_2B и FeB . В результате выполненных испытаний установлено, что наплавленный слой обладает высокой износостойкостью, превышающей износостойкость исходной стали в ≈ 2 раза; коэффициент трения наплавленного слоя в ≈ 2.2 раза ниже коэффициента трения стали в исходном состоянии.

Ключевые слова: сталь Hardox 450; наплавка; фазовый состав; микротвердость; износостойкость; коэффициент трения.

STUDY OF PHASE COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF ONE AND TWO TIMES OF MOLDING UP STRENGTHENING LAYER ON LOW-CARBON STEEL

Yu. A. Rubannikova, V.E. Gromov, D.A. Romanov, V.E. Kormyhev, O.A. Kondratova
Siberian State Industrial University,
42 Kirov Street, 654007 Novokuznetsk, Russia, rubannikova96@mail.ru

The methods of modern physical materials science have been used to study the structure, phase composition, mechanical and tribological properties of coatings, single and double deposited on hardox 450 (Fe-C-Ni-B) martensitic low carbon steel using cored wire. In the initial state, Hardox 450 steel has a structure formed during the low-temperature tempering of martensite of package morphology. It is shown that the microhardness of a double deposited layer with a thickness of ≈ 10 mm exceeds the microhardness of the base metal by more than 3 times. During surfacing (Fe - C - Ni - B), the hardening wire is due to the formation of submicron borides of composition Fe_2B and FeB . As a result of the tests performed, it was established that the deposited layer has high wear resistance exceeding the wear resistance of the original steel ≈ 2 times; the friction coefficient of the deposited layer is ≈ 2.2 times lower than the friction coefficient of the steel in the initial state.

Keywords: Hardox 450 steel; surfacing; phase composition; microhardness; velocity of wear.

Введение

Проблема повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов в настоящее время решается за счет целенаправленного и контролируемого изменения свойств их рабочих поверхностей. 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 экстремальных условиях, характеризующихся циклическими механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред и применяются в различных областях промышленности (строительной, металлургической, горнодобывающей и др.). Создание новых материалов, обладающих высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, связано с получением оптимального сочетания структур, наличия равномерного распределения по объему легирующих элементов, обеспечивающих высокие технологические свойства. Для обоснованного выбора материала наплавки, соответствующей условиям эксплуатации изделия, необходимо проведение подробных исследований

структуры, фазового состава, механических и трибологических свойств наплавленного металла [1].

Целью настоящей работы являлся анализ структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств одно- и двукратно наплавленного упрочняющего слоя на мартенситную низкоуглеродистую сталь Hardox 450 борсодержащей порошковой проволокой.

Материалы и методы исследования

Используемая в качестве материала основы сталь марки Hardox 450 (вес.%): 0.19-0.26 C; 0.70 Si; 1.60 Mn; 0.025 P; 0.010 S; 0.25 Cr; 0.25 Ni; 0.25 Mo; 0.004 B; остальное - Fe). характеризуется 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. Для повышения технологических свойств, сталь подвергают дополнительному модифицированию, в том числе и путем наплавления материала, обладающего требуемым комплексом свойств. Для формирования наплавки была выбрана порошковая проволока

(Fe-C-Ni-B) (0.7 % C; 2.0 % Mn; 1.0 % Si; 2.0 % Ni; 6.5% B). Наплавку проводили в среде защитного газа состава 98 % Ar, 2 % CO₂ при сварочном токе 250–300 А и напряжении на дуге 30–35 В. Наплавленный слой формировали за один и два прохода.

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 ВК6. Исследования фазового состава и дефектной субструктуры стали и наплавленного металла осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (метод тонких фольг) [2,3]. Фольги изготавливали из пластинок, вырезанных электроискровым методом из наплавленного металла (слой, расположенный на половине толщины наплавленного металла). Утонение вырезанных таким образом пластинок до толщины ≈200 нм (тонкая фольга, необходимая для анализа методами просвечивающей электронной микроскопии) осуществляли распылением металла ионным пучком (аргон) на установке «Ion Slicer» (фирма изготовитель JEOL). Механические свойства наплавленного металла и стали исследовали на микротвердометре HV 1000 методом Виккерса, нагрузка на индентор составляла 5 Н.

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 (рис. 1).

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, характерную для цементита, образующегося при низкотемпературном отпуске закаленной стали [4]. Дефектная субструктура пластин мартенсита представлена дислокациями. Скалярная плотность дислокаций составляет $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Структура наплавленного слоя

Выявлено формирование эвтектики пластинчатого типа. Особенностью фазового состава наплавленного за один проход слоя является формирование в эвтектике пластин борида железа преимущественно состава Fe₂B; в двойном наплавленном слое в эвтектике формируется преимущественно борид железа состава FeB.

Включения боридов железа, независимо от количества проходов при формировании наплавленного слоя, не содержат в своем объеме дислокационной субструктуры, что кардинально отличает их от прилегающих слоев α-фазы. Причиной отсутствия дислокационной субструктуры в пластинах боридов железа является их сравнительно высокая твер-

дость. Твердость Fe₂B и FeB равна (12.5-16.8) ГПа и (18.9-23.4) ГПа, соответственно [5, 6].



Рис. 1. Изображение мартенситной структуры стали Hardox 450 в исходном состоянии

Fig. 1. Image of the martensitic structure of Hardox 450 steel in the initial state

Разделяющая пластины боридов железа α-фаза, при однократном формировании наплавленного слоя представлена преимущественно мартенситом пакетной морфологии, характерное изображение которого приведено на рис. 2, а. Поперечные размеры пластин изменяются в пределах от 30 до 70 нм. В объеме пластин наблюдается дислокационная субструктура сетчатого типа. Судя по размерам ячеек дислокационных сеток, скалярная плотность дислокаций составляет 10^{11} см^{-2} . Высокая плотность дислокаций, пластинчатая морфология структуры прослоек указывают на мартенситный механизм формирования α-фазы с образованием ультрамелкой мартенситной структуры. Отметим, для сравнения, что в закаленной стали средние поперечные размеры пластин пакетного мартенсита изменяются в пределах (150-200) нм; поперечные размеры кристаллов пластинчатого мартенсита достигают единиц микрометров [4].

В наплавленном за два прохода слое структура α-фазы более разнообразна. Наряду с областями с наноразмерным мартенситом, подобным по морфологии мартенситу, формирующемуся в одиночно наплавленном слое, выявляются области с субзеренной структурой (рис. 2, б). Этот факт может свидетельствовать об изменении скорости охлаждения материала при формировании повторного наплавленного слоя.

Результаты исследования микротвердости материала при одинарном и двойном проходе формирования наплавленного слоя представлены на рис. 3. Анализ данных, полученных при построении профиля микротвердости, показывает, что при одном проходе формируется высокопрочный поверхностный слой толщиной ≈ 7 мм, микротвердость которого изменяется в пределах (12,0 – 14,0) ГПа и ≈17 ГПа при двойном проходе. Следовательно, твердость наплавленного слоя при одном проходе более чем в 2,7 раза превышает твердость металла основы (сталь Hardox-450) при толщине наплавленного слоя не менее 7 мм. При двойном проходе твердость наплавленного слоя более чем в 3 раза превышает твердость основы при толщине модифицированного слоя не менее 10 мм. Различие в твердости наплавленных слоев обусловлено, как показали выполненные исследования, различием фазового состава одинарного и двойного слоев.

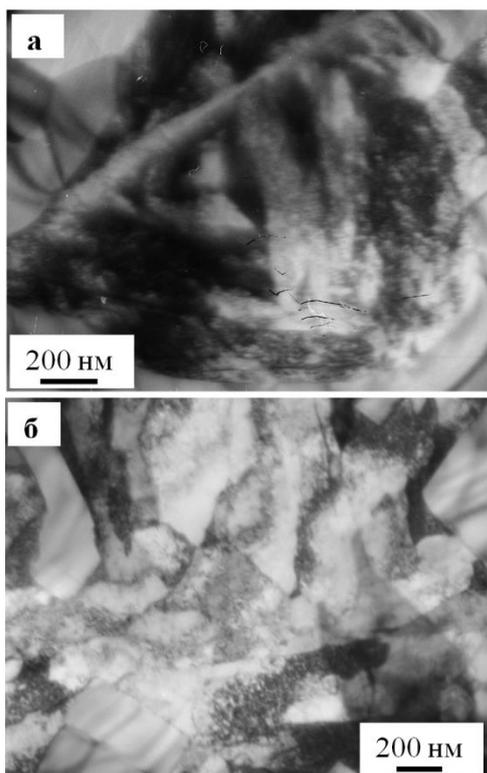


Рис. 2. Структура α -фазы, формирующейся в слое, наплавленном за один (а) и за два прохода (б)

Fig. 2. The structure of the α -phase, which is formed in the layer, deposited in one (a) and two passes (b)

При одном проходе в наплавленном слое формируется, преимущественно, борид железа состава Fe_2B , при двойном проходе – FeB , твердость которых различается в ≈ 1.5 раза. Установлено, что наплавленный слой обладает высокой износостойкостью, превышающей износостойкость исходной стали в ≈ 2 раза, а коэффициент трения наплавленного слоя в ≈ 2.2 раза ниже коэффициента трения стали в исходном состоянии.

Закключение

Выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств наплавленного на сталь Hardox 450 слоя, сформированного при одинарном и двойном проходе. Показано, что твердость наплавленного слоя зависит от количества проходов и при двух проходах превышает твердость металла основы (сталь Hardox - 450) в более чем три раза при толщине упрочненного материала более 10 мм. Установлено, что повышенные механические свойства наплавленного слоя связаны с формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой обусловлено закалочным эффектом (формирование ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы) и наличием включений боридов железа субмикронных размеров, формирующих эвтектику пластинчатого типа.

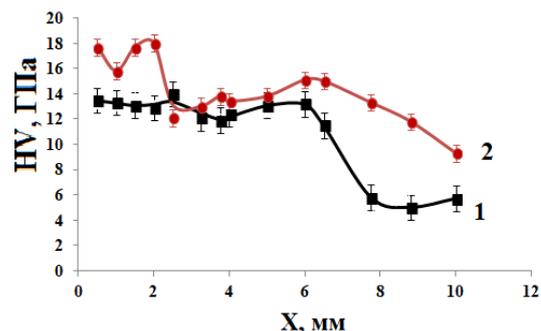


Рис. 3. Профиль микротвердости системы «наплавленный слой / сталь»; 1 – одинарный наплавленный слой; 2 – двойной наплавленный слой

Fig. 3. Microhardness profile of 'surfaced layer/(Hardox 450 steel) substrate'; 1 - single weld layer; 2 - double weld layer

Показано, что в одинарно наплавленном слое формируются преимущественно бориды железа состава Fe_2B ; в двойном наплавленном слое преимущественно бориды железа состава FeB .

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ Кемеровской области в рамках научного проекта № 18-48-420001 p_a.

Библиографические ссылки

1. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Структура и свойства композиционных износостойких наплавов на сталь. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ; 2014. 109 с.
2. Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. New York: Springer; 2014. 717 p.
3. Barry Carter C., David B., Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing; 2016. 518 p.
4. 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.
5. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. М.: Атомиздат; 1975. 376 с.
6. Кузьма Ю.Б., Чабан П.Ф. Двойные и тройные системы, содержащие бор: Справочник. М.: Metallurgy; 1990. 320 с.

References

1. Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E. et al. Structure and properties of composite wear-resistant weldings on steel. Novokuznetsk: Publishing House SibGIU; 2014. 109 p. (In Russian).
2. Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. New York: Springer; 2014. 717 p.
3. Barry Carter C., David B., Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing; 2016. 518 p.
4. Ivanov Yu.F., Cornet E.V., Kozlov E.V., Gromov V.E. Hardened structural steel: structure and hardening mechanisms. Novokuznetsk: Publishing House SibGIU; 2010. 174 p. (In Russian).
5. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. Borida Moscow: Atomizdat, 1975. 376 p (In Russian).
6. Kuzma Yu.B., Chaban P.F. Boron double and triple systems: Reference. Moscow.: Metallurgy, 1990. 320 p. (In Russian).