

УДК 621.793

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ ПОСЛЕ МИКРОДУГОВОГО БОРОВАНАДИРОВАНИЯ*

Степанов М.С., к.т.н., доцент кафедры «Управление качеством» (stepanovms@yandex.ru)

Домбровский Ю.М., д.т.н., профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» (yurimd@mail.ru)

Давидян Л.В., аспирант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение»

Донской государственный технический университет (ДГТУ)
(344010, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Аннотация. Борирование является распространенным способом химико-термической обработки стальных изделий, увеличивает их твердость и износостойкость, но повышает хрупкость поверхности, имеет большую длительность и трудоемкость. Для улучшения свойств применяют комбинированное покрытие бором и ванадием, а для снижения продолжительности процесса диффузионного насыщения возможно использование микродугового поверхностного легирования. Это позволяет интенсифицировать диффузию легирующих элементов за счет формирования у поверхности стального изделия зоны газового разряда. Целью работы было исследование структуры, фазового состава, механических свойств и износостойкости стали после борованадирования. В процессе экспериментов использовали обмазку, содержащую порошок карбида бора B_4C и феррованадия $FeV80$, которую наносили на поверхность стального образца. При борованадировании стали формируется поверхностный слой толщиной 150 – 190 мкм, имеющий основу микротвердостью 7,8 – 8,3 ГПа, в которой расположены светло-серые зернистые включения и участки эвтектики микротвердостью 13,5 – 14,0 ГПа. Далее расположен науглероженный слой эвтектоидной концентрации, переходящий в исходную феррито-перлитную структуру. Определено содержание легирующих элементов в характерных точках поверхностного слоя, которое подтвердило повышенное содержание углерода, ванадия и бора в основе слоя, участках эвтектики и карбидной фазе. Рентгеновским фазовым анализом установлено наличие в поверхностном слое стали боридов железа FeB и Fe_2B , боридов ванадия VB_2 и V_2B_3 и карбида ванадия $VC_{0,88}$. Механические свойства покрытий изучали методом микроиндентирования его поперечного сечения с регистрацией и анализом диаграммы деформации при нагружении и последующей разгрузке индентора. Твердость при индентировании в основе слоя увеличилась до 7,95 ГПа, в дисперсных включениях – до 13,90 ГПа. Модуль упругости при индентировании в основе и включениях составляет 238 и 340 ГПа соответственно. Ползучесть и доля пластической составляющей при микроиндентировании с ростом твердости закономерно снижаются. Мелкодисперсные включения боридов железа, боридов и карбидов ванадия значительно увеличивают износостойкость стали. Износостойкость при трении о закрепленные абразивные частицы возросла в четыре раза по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, химико-термическая обработка, диффузионное поверхностное насыщение, микродуговое поверхностное легирование стали, комплексное диффузионное насыщение бором и ванадием, формирование твердого покрытия карбидного типа, механические свойства покрытий.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-446-451

ВВЕДЕНИЕ

Одним из распространенных способов химико-термической обработки стальных изделий, который значительно увеличивает их твердость и износостойкость, является борирование [1 – 6]. Однако технологические процессы борирования длительны и трудоемки, а борированные покрытия обладают повышенной хрупкостью [7 – 9].

Улучшить свойства борированных изделий удавалось путем их насыщения бором в сочетании с карбидообразующим металлом – ванадием [10, 11]. Покрытия, содержащие бор и ванадий, получают в порошковых смесях путем нанесения обмазки или электролизно-

го насыщения. В качестве источника диффузанта используют порошки карбида бора и оксида ванадия или расплавы на основе солей ванадия. Рекомендуемая температура процесса 950 – 1100 °С, продолжительность – 2 – 4 часа [10].

Показано, что при борованадировании в поверхностном слое образуются сложные бориды железа и ванадия $(V, Fe)_2B$ [9].

С целью уменьшения продолжительности насыщения предложены новые технологии, которые позволяют достичь значительной интенсификации диффузионных процессов. Одной из таких технологий является микродуговая химико-термическая обработка (МДХТО), в которой ускорение диффузии насыщающих элементов достигается за счет формирования у поверхности стального изделия зоны газового разряда [12, 13]. Такая обработка может быть использована как для однокомпо-

* Исследование выполнено на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования научно-образовательного центра «Материалы» ДГТУ.

нентного насыщения, так и для одновременного насыщения несколькими легирующими элементами [14, 15]. Использование МДХТО представляет интерес для создания покрытий, полученных в результате комплексного насыщения бором и ванадием.

Целью настоящей работы явилось исследование структуры, фазового состава, механических свойств и износостойкости борванадированных покрытий, полученных в режиме микродугового нагрева стали.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовали экспериментальную установку, применяли методику работы [12]. На поверхность образцов из стали 20 длиной 35 мм и диаметром 12 мм наносили обмазку, содержащую диффузант. Образцы после этого погружали на глубину 15 мм в металлический контейнер, который заполняли свободным насыпом порошком каменного угля (антрацита) с размером частиц 0,4 – 0,6 мм. Насыпная плотность порошковой среды составляла 0,8 г/см³, а коэффициент заполнения контейнера частицами угля – 51 % (по объему). Далее образцы нагревали пропусканием электрического тока в цепи источник питания – контейнер – угольный порошок – образец. При протекании электрического тока через угольный порошок микродуговые разряды концентрируются вокруг поверхности образца с образованием области микродугового ореола. Углеродсодержащие газы, выделяющиеся при пиролизе угля, создают в контейнере защитную атмосферу, а также позволяют создать цементованный слой на поверхности стали. Предварительное нанесение на поверхность образцов обмазки, содержащей диффузант, позволяет осуществить комплексное насыщение, например, сформировать покрытия карбидного типа [13 – 15]. В настоящей работе для насыщения использовали обмазку, основой которой являлся электропроводный гель, а диффузантом – смесь порошков карбида бора В₄С и феррованадия FeV80 (ГОСТ 27130 – 94) в объемном соотношении 1:1. Плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см². Общая продолжительность процесса – 4 мин.

Поперечные шлифы образцов подвергались травлению реактивом Ржешотарского, после чего их исследовали с помощью микроскопов МИМ-7 и Neophot-21. Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450 – 76 с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,490, 0,196 и 0,098 Н. Регистрацию микроструктур выполняли цифровой камерой с разрешением 7,2 Мп. Рентгеновский фазовый анализ проводили с помощью дифрактометра ARL X'TRA-435 в Cu K_α-излучении.

Для получения изображения диффузионного слоя и определения концентрации насыщающих компонентов использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп ZEISS CrossBeam 340 с рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments

x-тах 80, точность измерения составляла 0,01 % (по массе).

Исследование механических свойств покрытий выполняли методом микроиндентирования с помощью установки Nanotest 600* производства фирмы MicroMaterials Ltd (Wrexham, Великобритания) по стандартной методике с использованием пирамидального индентора Берковича при нагрузке 100 мН. Анализ и расчет результатов микроиндентирования проводили методом Оливера-Фарра [16] в соответствии с данными работы [17].

Износостойкость упрочненных образцов оценивали по известной методике М.М. Хрущова и М.А. Бабичева испытаний на изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы [18, 19] на машине трения Х4-Б в соответствии с работой [20]. Для испытаний использовали цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 4 мм и длиной 35 мм, на торец которых наносилось испытываемое покрытие. Масса нагрузки составляла 310 г, длина пути трения – 30 м. Относительную износостойкость образцов определяли по соотношению изменения массы эталона (сталь 20) и образца с покрытием. Для взвешивания образцов использовали лабораторные весы марки ВЛТ-150-П с дискретностью отсчета 1 мг.

При испытаниях использовали тканевую шлифовальную шкурку марки 14А по ГОСТ 5009 – 82 из нормального электрокорунда марки 14А зернистостью М40, причем в каждом эксперименте осуществляли трение по свежей поверхности шкурки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При борванадировании стальных образцов в микродуговом режиме формируется поверхностный слой толщиной 150 – 190 мкм. В основе этого слоя микротвердостью 7,8 – 8,3 ГПа расположены светло-серые зернистые включения и участки эвтектики микротвердостью 13,5 – 14,0 ГПа. Далее расположен науглероженный слой эвтектоидной концентрации, переходящий в исходную феррито-перлитную структуру стали 20 (рис. 1).

Учитывая комплексный характер диффузионного насыщения стали углеродом, ванадием и бором, зернистые структурные составляющие идентифицированы как включения карбидного типа. Кроме того, одновременная диффузия углерода и бора при МДХТО, протекающая преимущественно по границам зерен, может приводить к появлению в этих участках тройной эвтектики железо – углерод – бор (1100 °С, 2,9 % В, 1,5 % С) [9].

Изображение диффузионного слоя в отраженных электронах (рис. 2) показало, что он состоит из темно-серой основы, участков эвтектики, а также включений округлого типа. Содержание бора и ванадия определяли в характерных точках слоя: основе (спектр 1), светло-серых включениях (спектр 2), участках эвтектики

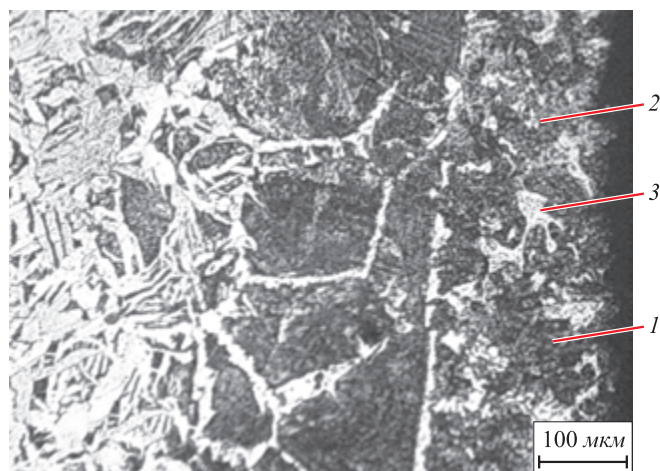


Рис. 1. Микроструктура диффузионного слоя после борованадирования:

1 – основа слоя; 2 – зернистые включения; 3 – участки эвтектики

Fig. 1. Microstructure of the diffusion layer after boriding and vanadation:

1 – layer base; 2 – granular inclusions; 3 – eutectic phases

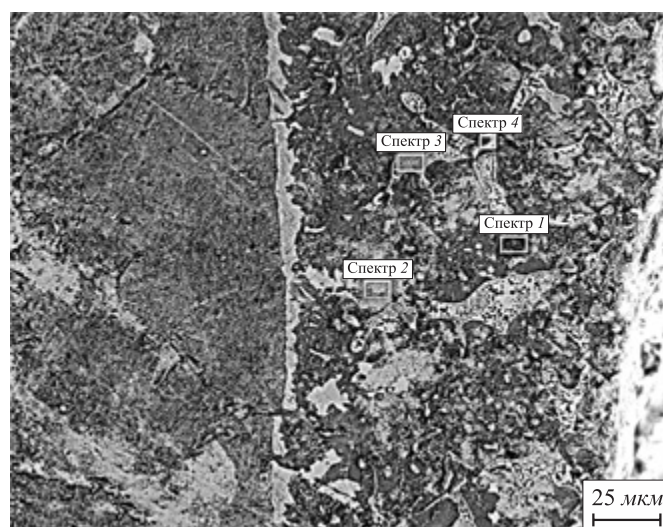


Рис. 2. Изображение диффузионного слоя борованадированного образца в отраженных электронах

Fig. 2. Image of the sample diffusion layer after boriding and vanadation in reflected electrons

(спектр 3) и округлых включениях (спектр 4). Результаты представлены в табл. 1.

По рентгеновскому фазовому анализу (РФА) (рис. 3) установлено наличие в поверхностном слое борованадированного образца боридов железа Fe_2B и Fe_3B , боридов ванадия VB_2 и V_2B_3 , а также карбида ванадия $VC_{0,88}$ с пониженным содержанием углерода по сравнению со стехиометрическим составом.

Таким образом, эти результаты подтвердили наличие в диффузионном слое карбидных и боридных фаз, а также боридной эвтектики с повышенным содержанием ванадия по сравнению с содержанием его в основе поверхностного слоя, что обусловлено преобладающей ролью зернограничной диффузии при МДХТО по сравнению с объемной.

Оценку механических свойств покрытия выполняли методом микроиндентирования его поперечного сечения с регистрацией и анализом диаграммы деформации при нагружении и последующей разгрузке индентора.

Анализ $P-h$ диаграмм (нагрузка – деформация) позволил определить: твердость при индентировании H_{IT} , модуль упругости при индентировании E_{IT} , ползучесть при индентировании C_{IT} , а также упругую μ_{IT} и пластическую $(1 - \mu_{IT})$ составляющие работы при индентировании. Эти показатели получали путем расчета по ГОСТ Р 8.748 – 2011 с использованием исходных данных анализа $P-h$ диаграмм (применяли программу прибора Nanotest 600).

Внедрение индентора осуществляли как в основу покрытия, так и в дисперсные включения десятикратно с усреднением результата. Примеры $P-h$ диаграмм с результатами их анализа в программе прибора Nanotest-600 представлены на рис. 4.

Т а б л и ц а 1

Концентрация элементов в характерных точках поверхностного слоя борованадированного образца

Table 1. Concentration of elements in the characteristic points of the sample surface layer after boriding and vanadation

Спектр	Содержание, % (по массе)						
	B	C	V	Si	Mn	Cr	Fe
1	0,51	5,45	1,83	0,20	0,52	0,19	91,30
2	0,39	5,47	1,68	0,18	0,29	0,12	91,87
3	4,79	11,38	3,67	0,13	0,27	0,18	79,58
4	0,12	23,73	72,01	0,05	0,09	0,06	3,94

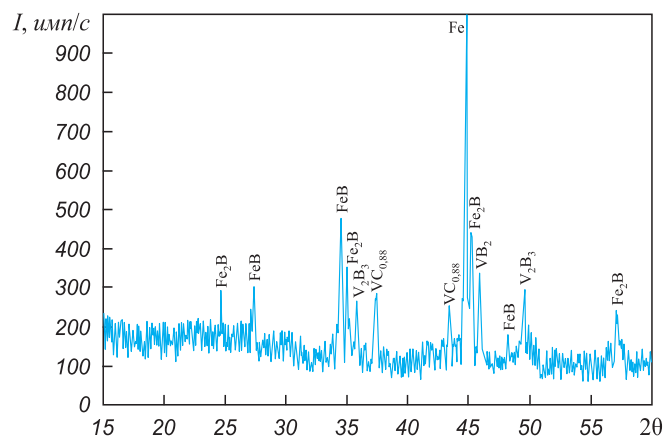
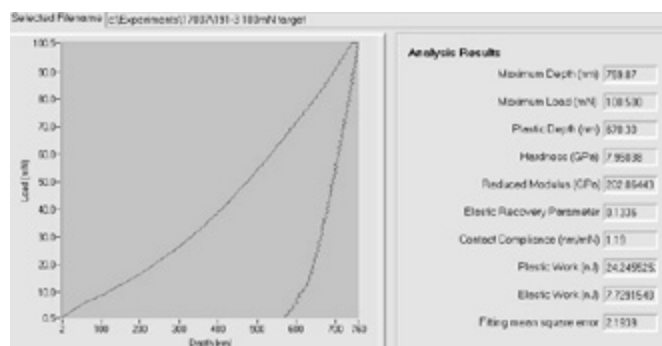
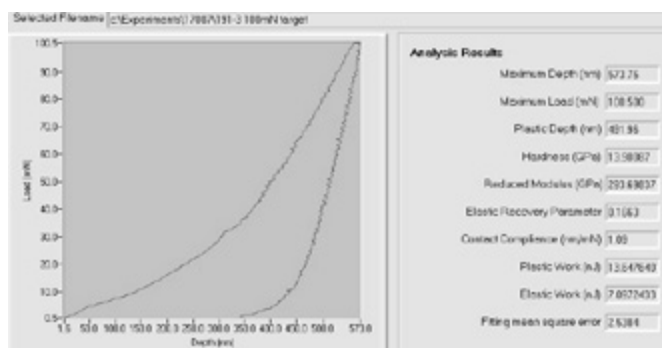


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма поверхности образца после микродугового борованадирования

Fig. 3. X-ray diffractogram of the sample surface after microarc boriding and vanadation



а



б

Рис. 4. $P-h$ диаграммы для борованадированного слоя на стали 20 при нагружении и разгрузке индентора в основу поверхностного слоя (а) и в дисперсные включения (б)

Fig. 4. $P-h$ diagrams of the layer after boriding and vanadation on steel 20 at indenter loading and unloading into the surface layer base (a) and into dispersed inclusions (b)

Ползучесть покрытия определяли по относительно изменению глубины микроиндентирования при постоянной испытательной нагрузке.

Результаты расчета механических характеристик приведены в табл. 2.

Твердость при индентировании в основе слоя возросла до 7,95 ГПа, а в дисперсных включениях составила 13,90 ГПа. Модуль упругости при индентировании в основе и включениях составляет 238 и 340 МПа соответственно. Ползучесть и доля пластической составляющей при микроиндентировании с ростом твердости закономерно снижаются.

Борованадированное покрытие на стали 20, содержащее мелкодисперсные включения боридов железа, боридов и карбидов ванадия, способствует существенному увеличению его износостойкости. При трении о закрепленные абразивные частицы после микродугового борованадирования она возросла в 4,0 раза по сравнению со сталью 20 в исходном состоянии.

Выводы

После микродугового борованадирования на поверхности стали 20 формируется поверхностный слой толщиной 150–190 мкм, имеющий основу микро-

Механические характеристики диффузионного слоя и стали 20 в исходном состоянии

Table 2. Mechanical characteristics of the diffusion layer and of steel 20 in the initial state

Образец	H_{IT} , ГПа	E_{IT} , МПа	C_{IT} , %	μ_{IT} , %	$(1 - \mu_{IT})$, %
Сталь 20 в исходном состоянии	2,80	210	4,29	9,0	91,0
Диффузионный слой, основа	7,95	238	2,49	24,2	75,8
Диффузионный слой, включения	13,90	340	1,68	34,2	65,8

твердостью 7,8–8,3 ГПа, в которой расположены светло-серые зернистые включения и участки эвтектики микротвердостью 13,5–14,0 ГПа. Далее следует науглероженный слой эвтектоидной концентрации, переходящий в исходную феррито-перлитную структуру стали 20.

Методом РФА в поверхностном слое борованадированного образца обнаружены бориды железа FeB и Fe₂B, бориды ванадия VB₂ и V₂B₃ и карбид ванадия VC_{0,88} с пониженным содержанием углерода по сравнению со стехиометрическим.

Твердость при микроиндентировании составила 7,95 ГПа для основы слоя и 13,90 ГПа для дисперсных включений, а модуль упругости – 238 и 340 ГПа соответственно. Ползучесть и доля пластической составляющей при микроиндентировании с ростом твердости закономерно снижаются.

Абразивная износостойкость стали 20 при трении о закрепленные абразивные частицы после микродугового борованадирования в 4,0 раза выше, чем в исходном состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Thermochemical Surface Engineering of Steels / Edited by Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers. – Woodhead Publishing, 2015. – 827 p.
2. Czerwinski Frank. Thermochemical Treatment of Metals. – INTECH Open Access Publisher, 2012. – 418 p.
3. Gopalakrishnan P., Shankar P., Palaniappa M., Ramakrishnan S.S. Interrupted Boriding of Medium-Carbon Steels // Metallurgical and Materials Transactions. 2002. Vol. 33A. No. 5. P. 1475–1485.
4. Kartal G., Eryilmaz O.L., Krumdick G., Erdemir A., Timur S. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257. P. 6928–6934.
5. Ucisk A.H., Bindal C. Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels // Surface and Coatings Technology. 1997. Vol. 94-95. P. 561–565.
6. Ugur Sen, Saduman Sen. The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels // Materials Characterization. 2003. Vol. 50. No. 4. P. 261–267.
7. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

8. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки: учебное пособие. – М.; Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
9. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
10. Борисенко Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Под ред Л.С. Ляховича. – М.: Metallurgy, 1981. – 424 с.
11. Лабунец В.Ф., Ворошнин Л.Г., Киндрачук М.В. Износостойкие боридные покрытия. – Киев: Техника, 1989. – 158 с.
12. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoi V.N. Diffusion saturation of carbon steel under microarc heating // *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. No. 1-2. P. 55 – 59.
13. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoi V.N. Micro-arc diffusion impregnation of steel with carbon and carbide-forming elements // *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. No. 5-6. P. 308 – 312.
14. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Термодинамический анализ реакций формирования карбидного слоя в стали при микродуговом насыщении молибденом // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 2. С. 77 – 81.
15. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Формирование покрытия карбидного типа при микродуговом ванадировании стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 262 – 267.
16. Головин Ю.И. Основы нанотехнологий. – М.: Машиностроение, 2012. – 656 с.
17. ГОСТ Р 8.748 – 2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 28 с.
18. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
19. Износостойкость и структура твердых наплавов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев, Е.С. Беркович и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 96 с.
20. ГОСТ 17367 – 71. Металлы. Методы испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 5 с.

Поступила в редакцию 9 апреля 2018 г.

После доработки 21 ноября 2018 г.

Принята к публикации 17 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 6, PP. 446–451.

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION, MECHANICAL PROPERTIES AND WEAR RESISTANCE OF STEEL AFTER MICROARC BORIDING AND VANADATION

M.S. Stepanov, Yu.M. Dombrovskii, L.V. Davidyan

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Boriding is a common method of thermo-chemical treatment of steel products. It increases their hardness and wear resistance, but also increases the surface fragility, has a long duration and high labor intensity. The combined coating with boron and vanadium is used to improve the properties, and it is possible to apply microarc surface alloying to reduce the duration of the diffusion saturation process. This makes it possible to intensify the diffusion of alloying elements by forming a gas discharge zone at the surface of the steel product. The aim of this work was to study the structure, phase composition, mechanical properties and wear resistance of steel after boriding and vanadation. During the experiments, a lubricant containing boron carbide powders B_4C and ferrovanadium FeV80 were used, which was applied to the surface of the steel sample. During boriding and vanadation of steel a surface layer with a thickness of 150 – 190 μm is formed. It has a base with microhardness of 7.8 – 8.3 GPa and light grey granular inclusions and eutectic areas with microhardness of 13.5 – 14.0 GPa. Further there is a carbonized layer of eutectoid concentration, passing into the original ferrite-perlite structure. The content of alloying elements in the characteristic points of the surface layer was determined, which confirmed the increased content of carbon, vanadium and boron in the base layer, areas of eutectic and carbide phase. X-ray phase analysis revealed the presence of iron borides FeB and Fe_2B , vanadium borides VB_2 and V_2B_3 and vanadium carbide $VC_{0.88}$ in the surface layer. Mechanical properties of coatings were studied by microindentation of its cross-section with registration and analysis of deformation diagram under loading and subsequent unloading of the indenter. Hardness at indentation in the base layer increased to 7.95 GPa, in dispersed inclusions – to 13.90 GPa. The modulus of elasticity for indentation in the base and inclusions is 238 MPa and 340 MPa, respectively. Creep and proportion of the plastic component in microindentation is naturally reduced with increase in hardness. Fine inclusions of iron borides, vanadium borides and carbides significantly increase the steel wear resistance. It has increased in 4 times during friction against the fixed abrasive particles in comparison with the initial state.

Keywords: surface hardening, thermochemical treatment, diffusion surface saturation, microarc surface alloying of steel, complex diffusion saturation with boron and vanadium, forming a hard carbide coating type, mechanical properties of coatings.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-446-451

REFERENCES

1. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Mittemeijer Eric J., Somers Marcel A.J. eds. Woodhead Publishing, 2015, 827 p.
2. Czerwinski Frank. *Thermochemical Treatment of Metals*. INTECH Open Access Publisher, 2012, 418 p.
3. Gopalakrishnan P., Shankar P., Palaniappa M., Ramakrishnan S.S. Interrupted boriding of medium-carbon steels. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2002, vol. 33, no. 5, pp. 1475–1485.
4. Kartal G., Eryilmaz O.L., Krumdick G., Erdemir A., Timur S. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. *Applied Surface Science*. 2011, vol. 257, no. 15, pp. 6928–6934.
5. Ucisik A.H., Bindal C. Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels. *Surface and Coatings Technology*. 1997, vol. 94-95, pp. 561–565.
6. Ugur Sen, Saduman Sen. The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels. *Materials Characterization*. 2003, vol. 50, no. 4, pp. 261–267.
7. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgy, 1985, 256 p. (In Russ.).
8. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki: uchebnoe posobie* [Theory and technology of chemical heat treatment: Tutorial]. Moscow: Minsk: Novoe znanie, 2010, 304 p. (In Russ.).
9. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plastichnost' borirovannykh sloev* [Plasticity of boronized layers]. Moscow: FIZMATLIT, 2010, 384 p. (In Russ.).
10. Borisenok G.V., Vasil'ev L.A., Voroshnin L.G. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical heat treatment of me-

- tals and alloys]. Lyakhovich L.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1981, 424 p. (In Russ.).
11. Labunets V.F., Voroshnin L.G., Kindrachuk M.V. *Iznosostoikie boridnye pokrytiya* [Wear resistant boride coatings]. Kiev: Tekhnika, 1989, 158 p. (In Russ.).
 12. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoi V.N. Diffusion saturation of carbon steel under microarc heating. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017, vol. 59, no. 1-2, pp. 55–59.
 13. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoi V.N. Micro-arc diffusion impregnation of steel with carbon and carbide-forming elements. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017, vol. 59, no. 5-6, pp. 308–312.
 14. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M. Thermodynamic analysis of formation reaction of a carbide layer in steel at microarc molybdenum saturation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 77–81. (In Russ.).
 15. Dombrovskii Yu.M., Stepanov M.S. Formation of carbide type coating in the process of microarc steel vanadation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 262–267. (In Russ.).
 16. Golovin Yu.I. *Osnovy nanotekhnologii* [Basics of nanotechnology]. Moscow: Mashinostroenie, 2012, 656 p. (In Russ.).
 17. *GOST R 8.748 – 2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumental'nom indentirovanii. Ch. 1. Metod ispytaniy* [State system for ensuring uniformity of measurements. Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials with instrumental indentation. Part 1. Test method]. Moscow: Standartinform, 2013, 28 p. (In Russ.).
 18. Khrushchov M.M., Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Nauka, 1970, 251 p. (In Russ.).
 19. Khrushchov M.M., Babichev M.A., Berkovich E.S., Kozyrev S.P., Kraposhina L.B., Pruzhanskii L.Yu. *Iznosostoikost' i struktura tverdykh naplavok* [Wear resistance and structure of hard surfacing]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 96 p. (In Russ.).
 20. *GOST 17367 – 71. Metally. Metody ispytaniya na abrazivnoe iznashivanie pri trenii o zakreplennye abrazivnye chastitsy* [GOST 17367 – 71. Metals. Methods of testing for abrasive wear by friction against fixed abrasive particles]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972, 5 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The study was carried out on the equipment of the resource center for collective use of the Scientific and Educational Center “Materials” of DSTU.
- Information about the authors:**
- M.S. Stepanov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Quality Management” (stepanovms@yandex.ru)
- Yu.M. Dombrovskii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Physical and Applied Material Science” (yurimd@mail.ru)
- L.V. Davidyan**, Postgraduate of the Chair “Physical and Applied Material Science”

Received April 9, 2018

Revised November 21, 2018

Accepted December 17, 2018