

УДК 621.793

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ КАРБИДНОГО ТИПА ПРИ МИКРОДУГОВОМ ВАНАДИРОВАНИИ СТАЛИ

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

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

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

Аннотация. Для интенсификации поверхностного диффузионного насыщения стали используют высокоэнергетическое воздействие на поверхность обрабатываемого материала. Рассмотрен процесс микродуговой химико-термической обработки, при котором стальное изделие погружают в контейнер, заполняемый порошком каменного угля, и нагревают пропусканием электрического тока. При этом в порошковой среде образуются микроразряды, которые концентрируются вокруг обрабатываемого изделия и создают область газового разряда. Это приводит к нагреву поверхности изделия и прилегающей порошковой среды. В результате пиролиза угля в контейнере образуется углеродсодержащая газовая среда, которая дает возможность осуществлять цементацию стали. Кроме того, возможно формирование поверхностных покрытий карбидного типа за счет одновременной диффузии углерода и легирующего элемента. В качестве его источника используется электропроводная обмазка, содержащая порошок диффузанта. Изучена возможность формирования покрытия карбидного типа при диффузионном насыщении низкоуглеродистой стали ванадием. Использовали цилиндрические образцы из стали 20 diam. 12 и длиной 35 мм. В качестве источника диффузанта применяли порошок низкоуглеродистого феррованадия. Плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см², температура возрастала от комнатной до 1250 °С. Для изучения структуры и фазового состава диффузионного слоя использовали оптическую микроскопию, растровый электронный микроскоп с системой энергодисперсионного микроанализа, рентгеновский фазовый анализ, атомно-силовую микроскопию, микродюретрический анализ. После обработки в течение 3 мин обнаружено формирование диффузионного слоя толщиной 170 – 180 мкм. Основой диффузионного слоя является твердый раствор ванадия в α -железе с концентрацией ванадия 3 – 4 % (по массе) и соотношением количества атомов в элементарной ячейке 9:1, соответствующим α -Fe₉V, микротвердостью 8,0 – 9,0 ГПа. В основе слоя расположены множественные наноразмерные карбидные включения, а также карбиды типа VC_{0,863} размером до 10 мкм с концентрацией ванадия около 64 % (по массе) микротвердостью 21,65 – 25,75 ГПа, претерпевающих атомное упорядочение с образованием кубической сверхструктуры V₈C₇.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение стали, химико-термическая обработка, диффузионное поверхностное насыщение, микродуговое поверхностное легирование стали, диффузионное насыщение стали ванадием, формирование твердого покрытия карбидного типа.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-262-267

Диффузионное насыщение сталей ванадием проводят с целью повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости. Обычно используют порошковые смеси на основе ванадия с добавкой хлорида аммония NH₄Cl в качестве активатора, позволяющего создать среду хлорида ванадия VCl₂, а также оксидов алюминия Al₂O₃ или титана TiO₂. Диффузионное насыщение выполняют при температуре 950 – 1100 °С в течение 4 – 6 ч [1 – 3].

При насыщении армко-железа основой диффузионного слоя является α -фаза – твердый раствор ванадия в α -железе.

Ванадирование стали приводит к возникновению на поверхности карбидной фазы VC, под которой расположена зона твердого раствора с включениями карбидов ванадия на границе с основой. Толщина диффузионного слоя не превышает 25 мкм, а его микротвердость составляет 17,4 – 19,5 ГПа [1, 2].

Большая продолжительность процесса ванадирования требует разработки новых технологий диффузионного насыщения.

Для интенсификации процесса могут быть использованы методы, основанные на применении высокоэнергетического воздействия на поверхность обрабатываемого материала [4 – 11]. Одним из них является микродуговая химико-термическая обработка (МДХТО) [12 – 15], при которой обрабатываемое стальное изделие погружается в металлический контейнер, заполняемый порошком каменного угля, и нагревается пропусканием электрического тока. Образование микроразрядов в угольном порошке и их последующая концентрация в локальной зоне вокруг обрабатываемого изделия приводят к возникновению области газового разряда, нагреву поверхности образца и прилегающей порошковой среды. Создание в контейнере углеродсодержащей атмосферы при пиролизе угля приводит к цементации стали [12]. Ранее было показано [13 – 15], что предварительное нанесение на поверхность стального изделия обмазки, содержащей карбидообразующий элемент, вызывает появление на поверхности стали покрытия карбидного типа за счет одновременной диффузии углерода и карбидообразующего элемента.

Настоящая работа посвящена изучению диффузионного ванадирования и определению возможности создания покрытия карбидного типа на поверхности низкоуглеродистых сталей с применением технологии МДХТО.

Процесс МДХТО осуществляли на экспериментальной установке [12] на цилиндрических образцах из стали 20 diam. 12 и длиной 35 мм, погруженных на половину длины в контейнер, заполняемый порошком каменного угля (антрацита) с размером частиц 0,4 – 0,6 мм. В качестве источника диффузанта на поверхность образцов наносили электропроводную обмазку, содержащую порошок феррованадия ФВд75А по ГОСТ 4760 – 78. Плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см², температура возрастала от комнатной до 1250 °С при общей продолжительности процесса 3 мин.

Микроструктурный анализ диффузионного слоя выполняли с помощью микроскопов МИМ-7 и Neophot-21 на поперечных шлифах образцов, протравленных реактивом Ржешотарского. Регистрацию микроструктур выполняли цифровой фотокамерой с разрешением 7,2 Мп.

Для получения изображения диффузионного слоя и его концентрационного профиля использовали растровый электронный микроскоп VEGA II LMU фирмы Tescan с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT.*

Рентгеновский фазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-8 в базовой конфигурации с рентгеновской трубкой 2.0БСВ-27 Со; диапазон сканирования: 2 θ составлял 3 – 150°. ** Для идентификации фаз дифрактометр комплектуется банком международного центра порошковых дифрактограмм ICDD PDF-2 Data Base Card.

Рельеф поперечного шлифа диффузионного слоя образцов получен с помощью атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator *** в режиме постоянной силы.

Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450 – 76 с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,196 и 0,490 Н.

После обработки продолжительностью 3 мин на поверхности образцов обнаружен диффузионный слой толщиной 170 – 180 мкм, в котором расположены слаботравящиеся включения размером до 10 мкм. Далее следует характерная для стали 20 ферритно-перлитная структура (рис. 1).

Микротвердость основы диффузионного слоя находится в диапазоне 8,0 – 9,0 ГПа, а слаботравящихся включений – 21,0 – 25,0 ГПа, что соответствует микротвердости карбидов ванадия [16].

* Исследование выполнено на оборудовании Института наук о Земле Южного Федерального университета, г. Ростов-на-Дону.

** Исследование выполнено на оборудовании АО НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург.

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

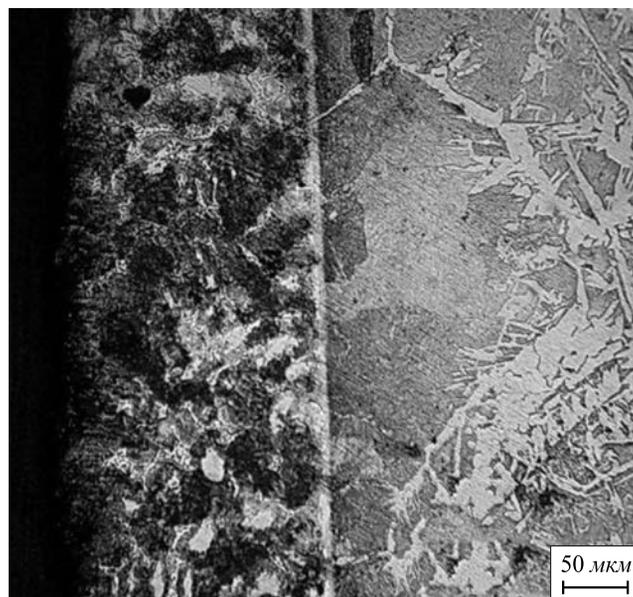


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после ванадия в микродуговом режиме

Fig. 1. Microstructure of the surface layer of steel 20 after vanadium saturation in microarc mode

Содержание ванадия в диффузионном слое определяли с помощью растрового электронного микроскопа, для чего использовали ВЕС-детектор отраженных (обратно-рассеянных) электронов. Получаемое изображение создает фазовый контраст, возникающий вследствие зависимости величины потери энергии первичного электронного пучка от атомной массы элемента, с которым произошло столкновение. Поэтому участки диффузионного слоя, насыщенные ванадием, имеют более темный оттенок.

Изображение диффузионного слоя в отраженных электронах (рис. 2) показало, что он состоит из светлосерой основы, в которой расположены темные включения.

Распределение содержания ванадия по глубине диффузионного слоя (рис. 2) определяли по линии от точки 1 (основной металл) до точки 8 (поверхность образца). Результаты приведены ниже:

Точка на рис. 2, а	1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание V, % (по массе)	–	29,87	3,08	33,14	3,27	3,32	3,59	3,90

В точках 2, 4, частично расположенных во включениях, содержание ванадия составило 30 – 33 % (по массе); в точках 3, 5 – 8, расположенных в основе, оно изменилось от 3,08 (точка 3 в глубине диффузионного слоя) до 3,90 % (по массе) (точка 8 на поверхности); за пределами диффузионного слоя (точка 1) ванадий не обнаружен.

Для уточнения концентрации ванадия в отдельных структурных составляющих она была измерена

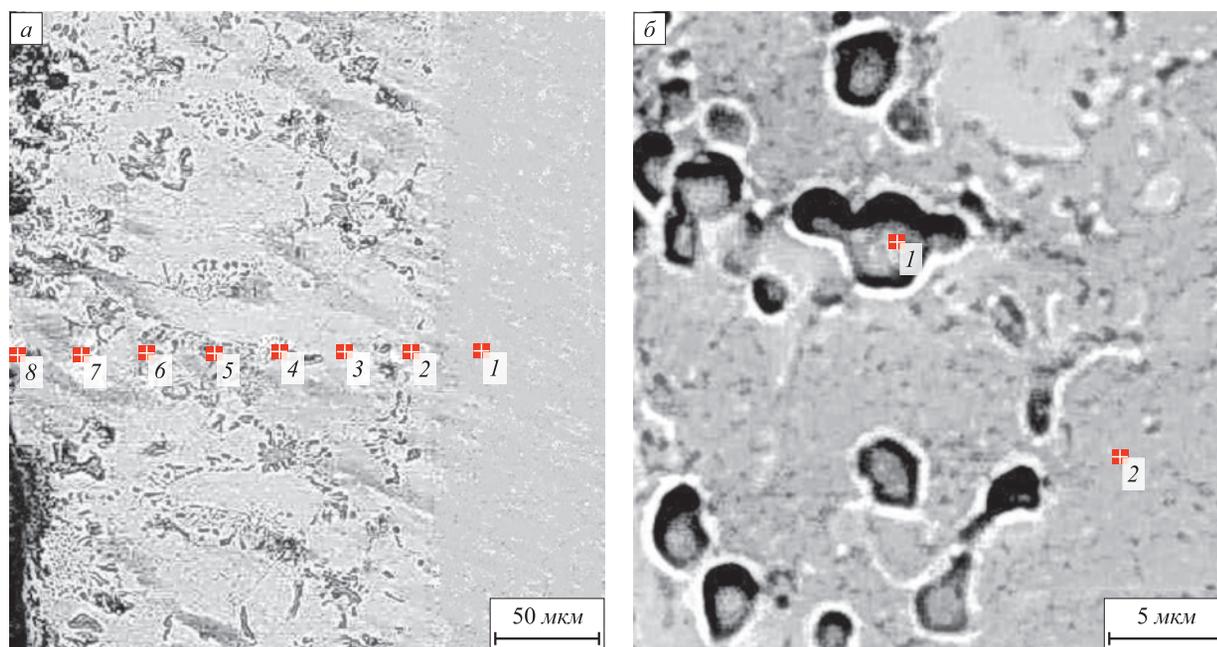


Рис. 2. Изображение диффузионного слоя (а) и отдельного его участка (б) в отраженных электронах

Fig. 2. Image of the diffusion layer (a) and of a part of the diffusion layer (b) in reflected electrons

на изображении при большем увеличении (рис. 2, б): в точке 1, расположенной на включении, и в точке 2, расположенной в основе. В точке 1 содержание ванадия было 64,49 % (по массе), а в точке 2 – 3,39 % (по массе). Включения представляют собой карбидную фазу, а основа диффузионного слоя – α -твердый раствор ванадия в железе.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в точках 1 и 2 (рис. 2, б) получен энергетический (EDX) спектр, подтверждающий присутствие фаз с повышенным содержанием ванадия (рис. 3).

Дифрактограмма поверхности образца, полученная рентгеновским фазовым анализом (РФА) (рис. 4), подтвердила наличие карбидной фазы VC с пониженным содержанием ванадия VC_{0,863} по сравнению со стехио-

метрическим (с параметром ячейки $a = 0,83300$ нм, карточка PDF-2 ASTM 03-065-6945), а также твердого раствора ванадия в α -железе с соотношением количества атомов в элементарной ячейке 9:1, соответствующим α -Fe₉V (с параметром ячейки $a = 0,28782$ нм, карточка PDF-2 ASTM 03-065-7509).

Таким образом, методом РФА подтверждено, что основой диффузионного слоя является α -твердый раствор ванадия в железе.

Следует отметить, что карточка ASTM 03-065-6945, использованная программой при автоматическом анализе дифрактограммы, содержит неточность. Монокарбид ванадия VC1-х имеет параметр ячейки $a = 0,4166 - 0,4126$ нм (в зависимости от содержания углерода). Обнаруженный на дифрактограмме рефлекс с параметром ячейки $a = 0,83300$ нм соответствует кубической сверхструктуре карбида V₈C₇, которая, как было показано в работах [17–20], образуется при температурах ниже 1100 °С в карбидах типа VC1-х в результате атомного упорядочения.

Высокая микротвердость (8,0 – 9,0 ГПа) основы диффузионного слоя позволила предположить присутствие в нем мелкодисперсных карбидных включений, которые не обнаруживались металлографически. В этой связи проведено исследование рельефа поверхностного слоя методом атомно-силовой микроскопии. На рис. 5, а показан фрагмент диффузионного слоя размером 30×30 мкм с выделенным сечением 1, а на рис. 5, б – профиль, соответствующий указанному сечению. Трехмерное изображение выделенного участка поверхности размером 7,5×7,5 мкм (рис. 6, а) представлено на рис. 6, б.

Из рис. 5 и 6 видно, что рельеф поверхности определяется наличием как отдельных относительно крупных

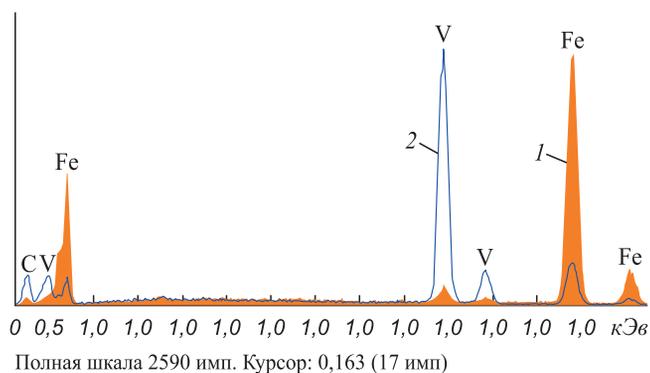


Рис. 3. Энергетический спектр, полученный методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

Fig. 3. The energy spectrum obtained by energy dispersive X-ray spectroscopy

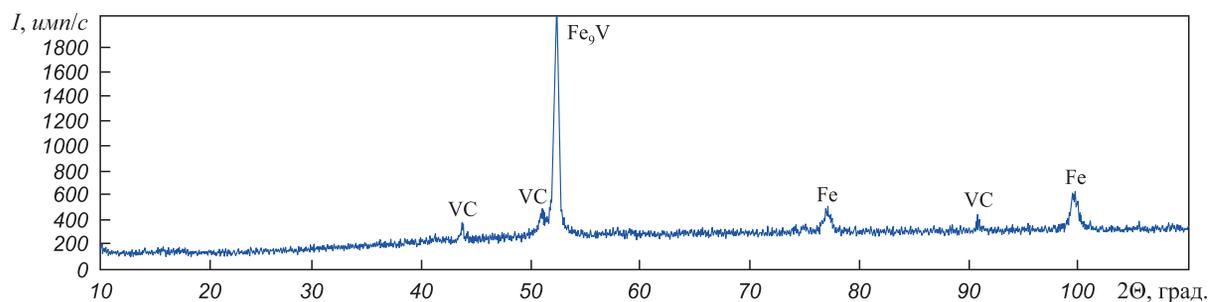


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма образца после ванадия в микродуговом режиме

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the sample after vanadium saturation in microarc mode

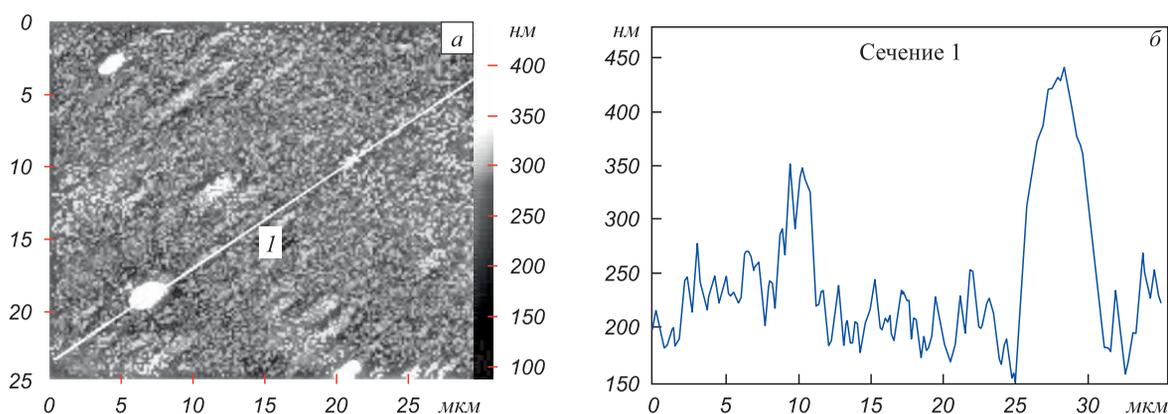


Рис. 5. Рельеф поверхностного слоя, полученный с помощью сканирующего зондового микроскопа: а – сечение; б – профиль

Fig. 5. The surface layer relief, obtained using scanning probe microscope: а – section; б – profile

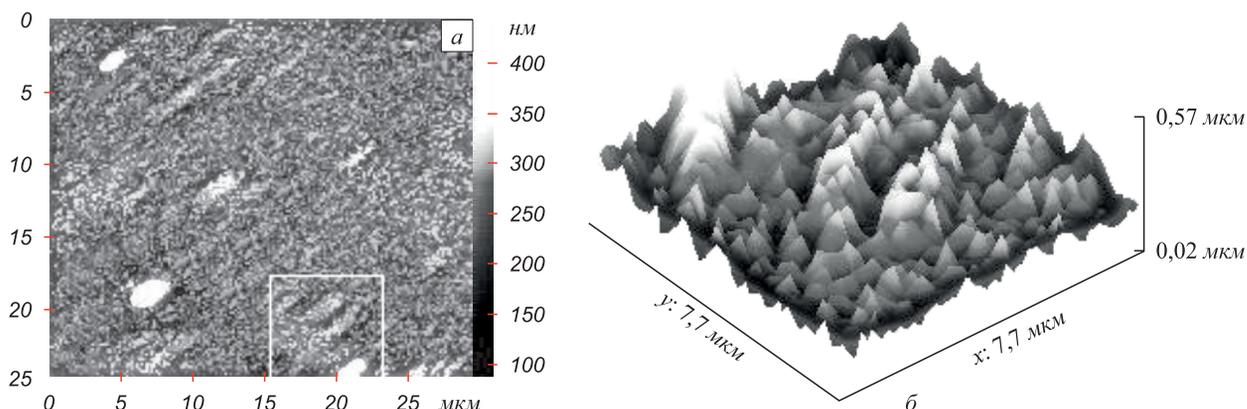


Рис. 6. Трехмерное изображение поверхностного слоя, полученное с помощью сканирующего зондового микроскопа: а – область сканирования; б – трехмерное изображение

Fig. 6. Three-dimensional image of the surface layer obtained using a scanning probe microscope: а – scan area; б – three-dimensional image

карбидов, имеющих вид включений округлой формы размером до 3 мкм, выступающих над поверхностью шлифа на высоту до 350 нм, так и большим количеством наноразмерных карбидных включений, выступающих над поверхностью на высоту 10–50 нм, что обусловлено высокой твердостью и износостойкостью карбидов ванадия при полировке по сравнению с более

мягкими участками окружающей матрицы. Наличием таких наноразмерных включений в основе диффузионного слоя объясняется повышенный уровень ее микротвердости.

Выводы. Микродуговое легирование позволяет создавать диффузионные покрытия карбидного типа на поверхности малоуглеродистой стали. При ванади-

ровании стали 20 в микродуговом режиме в течение 3 мин формируется диффузионный слой толщиной 170–180 мкм. Основой диффузионного слоя является твердый раствор ванадия в α -железе микротвердостью 8,0–9,0 ГПа. В ней расположены множественные наноразмерные карбидные включения, а также карбиды типа $VC_{0,863}$ размером до 10 мкм микротвердостью 21,0–25,0 ГПа, претерпевающих атомное упорядочение с образованием кубической сверхструктуры V_8C_7 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошин и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук. – Киев: Техника, 1991. – 168 с.
3. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие. – М.: Новое знание; Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
4. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / И.Н. Кидин, В.И. Андрущечкин, В.А. Волков, А.С. Холин. – М.: Металлургия, 1978. – 320 с.
5. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.
6. Шатинский В.Ф., Нестеренко А.И. Защитные диффузионные покрытия. – Киев: Наукова думка, 1988. – 272 с.
7. Спиридонов Н.В., Кобыков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
8. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х т. – М.: Техносфера, 2011. Т. 1. – 464 с.
9. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. – М.: Техносфера, 2012. – 464 с.
10. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
11. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 216 с.
12. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 25–29.
13. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Формирование карбидного покрытия при микродуговом хромировании стали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 1. С. 35–38.
14. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Формирование карбидного покрытия при микродуговом молибденировании стали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 10. С. 34–38.
15. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M. Thermodynamic Analysis of Carbide Layer Formation in Steel with Microarc Saturation by Molybdenum // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. № 2. P. 79–82.
16. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справ. издание / Под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
17. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов: Справ. изд. / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1988. – 319 с.
18. Курлов А.С., Гусев А.И. Микроструктура нанокристаллического нестехиометрического карбида ванадия $VC_{0,875}$ // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. Вып. 2. С. 385–391.
19. Гусев А.И. Нестехиометрия и сверхструктуры // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 9. С. 905–945.
20. Ремпель А.А., Валеева А.А. Материалы и методы нанотехнологий. – Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета, 2015. – 136 с.

Поступила 21 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 4, pp. 262–267.

FORMATION OF CARBIDE TYPE COATING IN THE PROCESS OF MICROARC STEEL VANADATION

Yu.M. Dombrovskii, M.S. Stepanov

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

Abstract. The high-energy impact on the material surface is used for the intensification of surface diffusion saturation of steel. The article describes the process of microarc thermochemical treatment in which a steel product was immersed in a container filled with coal powder, and was heated by passing electric current. Microdischarges are formed in a powder environment. They are concentrated around the product and create a region of gas discharge. This leads to surface heating of the product and the surrounding powder environment. The pyrolysis of coal in a container formed a carbon-containing environment, which enables to carry out carburizing of steel. In addition, there is a possibility of formation of carbide type surface due to the simultaneous diffusion of carbon and alloying element. Its source is a conductive coating containing the powder of diffusant. The authors have investigated the possibility of forming the coatings of carbide type by diffusion saturation of low carbon steel with vanadium. The cylindrical samples of steel 20 with a diameter of 12 mm and length 35 mm were used. The powder of low carbon ferrovanadium was used as the source of diffusant. The current density on the surface of the samples was 0.53 A/cm², the temperature was increased from ambient to 1250 °C.

To study the structure and phase composition of the diffusion layer optical microscopy, scanning electron microscope with energy dispersive microanalysis system, X-ray phase analysis, atomic force microscopy, microhardness analysis were used. After treatment for 3 min it was detected the formation of the diffusion layer with thickness of 170–180 μm. The basis of the diffusion layer is a solid solution of vanadium in α -iron with a vanadium concentration of 3–4 wt. % and the ratio of the number of atoms in the unit cell is 9:1, corresponding to α -Fe₉V with microhardness of 8.0–9.0 GPa. The layer base comprises the multiple nanoscale carbide inclusions, as well as carbides of the $VC_{0,863}$ type with the size up to 10 microns with vanadium concentration about 64 wt. % and microhardness of 21.65–25.75 GPa, undergoing the atomic ordering with the formation of the cubic V_8C_7 superstructure.

Keywords: surface hardening of steel, thermochemical treatment, diffusion, surface saturation, micro-arc surface alloying of steel, diffusion saturation of steel with vanadium, forming a hard carbide coating type.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-262-267

REFERENCES

1. Borisenok G.V., Vasil'ev L.A., Voroshin L.G. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i spлавov: spravochnik* [Chemical-thermal

- treatment of metals and alloys: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 424 p. (In Russ.).
2. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindrachuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coatings]. Kiev: Tekhnika, 1991, 168 p. (In Russ.).
 3. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki: ucheb. posobie* [Theory and technology of chemical-thermal treatment: Manual]. Moscow: Novoe znanie; Minsk: Novoe znanie, 2010, 304 p. (In Russ.).
 4. Kidin I.N., Andryushechkin V.I., Volkov V.A., Kholin A.S. *Elektrokhimiko-termicheskaya obrabotka metallov i spлавov* [Electrochemical and thermal treatment of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 320 p. (In Russ.).
 5. *Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki* [Handbook of electrochemical and electrophysical methods of processing]. Volosatov V.A. ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1988, 719 p. (In Russ.).
 6. Shatinskii V.F., Nesterenko A.I. *Zashchitnye diffuzionnye pokrytiya* [Protective diffusion coatings]. Kiev: Naukova dumka, 1988, 272 p. (In Russ.).
 7. Spiridonov N.V., Kobayakov O.S., Kupriyanov I.L. *Plazmennyye i lazernyye metody uprochneniya detalei mashin* [Plasma and laser methods for hardening of machine parts]. Minsk: Vysheishaya shkola, 1988, 155 p. (In Russ.).
 8. Suminov I.V., Belkin P.N., Epel'fel'd A.V. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i spлавov* [Plasma-electrolytic modification of surface of metals and alloys]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, vol. 1, 464 p. (In Russ.).
 9. Berlin E.V., Koval' N.N., Seidman L.A. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka poverkhnosti stal'nykh detalei* [Plasma chemical-thermal treatment of surface of steel parts]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 464 p. (In Russ.).
 10. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyanskii P.A. *Plazmennyye tekhnologii. Svarka, nanosenie pokrytii, uprochnenie* [Plasma technologies. Welding, coating, hardening]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 406 p. (In Russ.).
 11. Tyurin Yu.N., Zhadkevich M.L. *Plazmennyye uprochnyayushchie tekhnologii* [Plasma strengthening technologies]. Kiev: Naukova dumka, 2008, 216 p. (In Russ.).
 12. Dombrovskii Yu.M., Stepanov M.S. Microarc cementation of steel products in powdered environments. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2013, no. 12, pp. 25–29. (In Russ.).
 13. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M. Formation of a carbide coating during micro-arc chrome plating of steel. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2015, no. 1, pp. 35–38. (In Russ.).
 14. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M. Formation of carbide coating during microarc molybdenization of steel. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2015, no. 10, pp. 34–38. (In Russ.).
 15. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M. Thermodynamic analysis of carbide layer formation in steel with microarc saturation by molybdenum. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 2, pp. 79–82.
 16. *Svoistva, poluchenie i primeneniye tugoplavkikh soedinenii. Sprav. izdanie* [Properties, production and application of refractory compounds. Reference book]. Kosolapova T.Ya. ed. Moscow: Metallurgiya, 1986, 928 p. (In Russ.).
 17. Holleck H. *Binäre und ternäre Carbid- und Nitridsysteme der Übergangsmetalle. Materialkundlich-Technische Reihe*. Nr. 6, Hrsg. G. Petzow. Berlin- Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1984, 295 S. (Russ.ed.: Holleck H. *Dvoynye i troynye karbidnye i nitridnye sistemy perekhodnykh metallov*: Sprav. izd. Moscow: Metallurgiya, 1988, 319 p.).
 18. Kurlov A.S., Gusev A.I. Microstructure of nanocrystalline nonstoichiometric vanadium carbide VC_{0,875}. *Physics of the Solid State*. 2013, vol. 55, no. 2, pp. 430–436.
 19. Gusev A.I. Nonstoichiometry and superstructures. *Physics-Uspekhi*. 2014, vol. 57, no. 9, pp. 839–876.
 20. Rempel' A.A., Valeeva A.A. *Materialy i metody nanotekhnologii* [Materials and methods of nanotechnology]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo federal'nogo universiteta, 2015, 136 p. (In Russ.).

Information about the authors:

Yu.M. Dombrovskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Physical and Applied Material Science” (yurimd@mail.ru)

M.S. Stepanov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Quality Management” (stepanovms@yandex.ru)

Received 21 December, 2016