

# ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАСЫЩАЮЩИХ ПОРОШКОВЫХ СРЕД НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННЫХ КАРБИДНЫХ СЛОЕВ

*В.А. БУТУХАНОВ, инженер*

*Б.Д. ЛЫГДЕНОВ, доктор техн. наук, доцент  
(ВСГУТУ, г. Улан-Удэ)*

Поступила 25 апреля 2016

Рецензирование 10 мая 2016

Принята к печати 15 мая 2016

**Бутуханов В.А.** – 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40 В,  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,  
e-mail: butuhanov\_vyacheslav@mail.ru

Выполнена оптимизация составов насыщающих смесей в системе Cr-V по износостойкости при трении скольжения без смазки диффузионных карбидных слоев, полученных на стали У7 методом химико-термической обработки. Математическое моделирование позволило сократить число опытов и определить оптимальный состав двухкомпонентной смеси для обеспечения максимальной износостойкости. Проведены исследования структуры и свойств диффузионных слоев методами металлографического, дюрометрического и микрорентгеноспектрального анализов. Установлено, что при одновременном насыщении в порошках ферросплавов формируются диффузионные слои на основе карбидов ванадия и карбидов хрома. Показано, что двухкомпонентные слои превосходят однокомпонентные по износостойкости. При насыщении стали У7 в составе, содержащем 76 % феррованадия и 24 % феррохрома, износостойкость при трении скольжения без смазки в 22,4 раза превышает износостойкость образцов после закалки и низкого отпуска. Установлено, что повышение уровня износостойкости обусловлено увеличением твердости диффузионного слоя до значения 25 ГПа и наличием карбидной фазы типа VC.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, диффузионные слои, планирование эксперимента, рентгеноспектральный анализ, износостойкость, микротвердость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-80-86

## Введение

Для повышения износостойкости стальных изделий широкое применение нашли карбидные слои. Карбиды сочетают в себе высокие физико-химические и механические свойства [1]. Анализ литературных данных о нанесении карбидных покрытий на поверхность сталей и твердых сплавов показал возможность получения износостойких слоев с помощью различных технологий (химико-термическая обработка, PVD, CVD, электронно-лучевая обработка) [2–7]. Метод химико-термической обработки (ХТО) выбран авторами в связи с простотой применяемого технологического оборудования. Одним

из преимуществ метода ХТО является высокая адгезия в результате взаимной диффузии компонентов. Известно, что особенно высокими показателями механических свойств обладают многокомпонентные диффузионные слои [8, 9]. Экстремум свойств достигается в сложных карбидных системах, образованных при наличии взаимной растворимости карбидов. Оптимизация по твердости и износостойкости процесса диффузионного насыщения высокоуглеродистой стали хромом, ванадием, марганцем на основе порошков оксидов соответствующих металлов выполнялась автором работы [10]. Специальную насыщающую смесь получали методом СВС путем восстановления оксида алюминием.

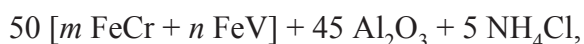
В результате исследований установлено повышение стойкости при абразивном изнашивании до 40,5 раз по сравнению с образцом без ХТО. Применение оксидов предполагает их предварительную подготовку (нагрев смеси с целью восстановления) [11]. При использовании в качестве насыщающих сред порошков ферросплавов с грануляцией 0,4 мм подобная предварительная подготовка исключается.

Цель настоящей работы состоит в исследовании структуры и свойств диффузионных слоев после насыщения в смесях с различным соотношением феррохрома и феррованадия.

### Материалы и методы

Химико-термическую обработку осуществляли в контейнерах с плавким затвором при 1000 °С в течение 6 ч в муфельной электропечи.

Насыщающие смеси имели общий состав:



где  $m$  и  $n$  – соотношения порошков феррохрома и феррованадия. Указанные соотношения и соответствующие им составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер состава	FeCr, %	FeV, %
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Оксид алюминия предотвращал спекание частиц порошков и прилипание их к поверхности образцов. Хлористый аммоний, разлагаясь и взаимодействуя с активными атомами насыщающих элементов, генерировал активную газовую среду.

Оптимизацию составов насыщающих смесей по износостойкости осуществляли методом симплекс-планирования [12, 13] по пяти экспериментальным опытам.

Испытания на износостойкость карбидных слоев в условиях трения скольжения без смазки по схеме «диск-плоскость» проводили на машине трения типа Амслера при нагрузке 500 Н и 300 об/мин в течение 30 мин. Показатель отно-

сительной износостойкости  $K_{\text{и}}$  рассчитывали по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{и}}},$$

где  $\Delta m_{\text{э}}$  – потеря массы эталона;  $\Delta m_{\text{и}}$  – потеря массы образца. В качестве эталона использовали образцы стали У7 после закалки и низкого отпуска (HRC 58-60). Потерю массы определяли на аналитических весах WA-31.

Микроструктуру диффузионных слоев исследовали на оптическом микроскопе «Neophot-21». В связи с толщиной диффузионных слоев, не превышающей 20 мкм, для определения микротвердости изготавливали косые шлифы. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в Центре коллективного пользования «Прогресс» на растровом электронном микроскопе JSM-6510 LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350.

### Результаты и обсуждение

Параметром оптимизации  $y$  являлась износостойкость в условиях трения скольжения без смазки. Математическое моделирование составов подробно описано в работе [14]. Получено уравнение

$$y = 19,36 + 4,74x - 0,81x^2 - 0,94x^3 = f(X_1).$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным проверяли по критерию Фишера. Подставив в уравнение безразмерные величины  $X_{1\text{и}}$ , рассчитали величины  $\hat{y}_{\text{и расч}}$  и невязки  $\Delta_{\text{и}}$  (табл. 2).

Зависимость показателя относительной износостойкости (в условиях трения скольжения без смазки) от состава насыщающей смеси представлена на рис. 1.

Оптимальный состав двухкомпонентной смеси с максимальной износостойкостью ( $K_{\text{и}} = 22,4$  ед.) определили из полученного уравнения:  $x_{1\text{опт}} = 0,76$ , т. е. 76 % феррованадия;  $x_{2\text{опт}} = 0,24$ , или 24 % феррохрома. Таким образом, состав № 4 наиболее близок к оптимальному составу, рассчитанному методом симплекс-планирования и обеспечивающему максимальную износостойкость в условиях трения скольжения без смазки.

Таблица 2

№ п/п	V, %	$x_{1и}$	$X_{1и}$	Cr, %	$x_{2и}$	$\bar{y}_{и\text{ эксп}}$ , ед	$\hat{y}_{и\text{ расч}}$ , ед	$\Delta_{и}$ , ед
1	0	0,0	-2	100	1,0	14,2	14,1	-0,1
2	25	0,25	-1	75	0,75	14,6	14,7	0,1
3	50	0,50	0	50	0,50	19,6	19,3	-0,3
4	75	0,75	1	25	0,25	22,2	22,3	0,1
5	100	1,00	2	0	0,0	18,1	18	-0,1

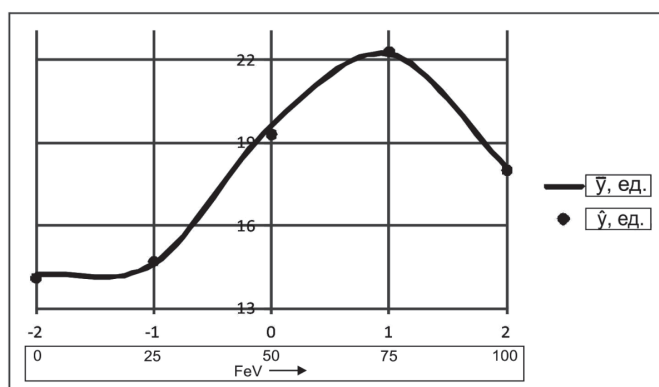


Рис. 1. Зависимость показателя относительной износостойкости от состава насыщающей смеси

Формирование карбидного слоя происходит вследствие двух одновременно протекающих процессов: транспортировки атомов насыщающих элементов к поверхности образца и диффузии атомов углерода из сердцевины к поверхности. Таким образом, под карбидными слоями наблюдаются плохо травящиеся обезуглероженные зоны. Анализ диаграмм состояния систем Fe-C-Me позволяет сделать вывод, что образующиеся переходные зоны представляют собой эвтектоид, состоящий из твердого раствора V, Cr в  $\alpha$ -железе. Микротвердость переходной зоны сразу за границей раздела со слоем на основе карбидов хрома и ванадия составляет 4 ГПа.

Эксплуатационные свойства карбидных слоев зависят не только от состава, но и от содержания и распределения углерода и легирующих элементов. Данные о распределении элементов по толщине слоев представляют интерес, так как позволяют делать выводы о процессах диффузии элементов в слое.

Для всех полученных слоев характерно, что на границе раздела карбидный слой – матрица насыщаемой стали концентрация карбидообразующего элемента резко снижается, плавно уменьшаясь по толщине переходной зоны.

При насыщении стали У7 в составе № 1 формируется хромированный слой, содержащий карбидные фазы типа  $(Cr,Fe)_7C_3$  и  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  [15] с микротвердостью 16...18 ГПа. Одновременное насыщение двумя карбидообразующими элементами состава № 2 (рис. 2) приводит к формированию слоя с двумя участками: на основе карбида хрома на внешней стороне слоя и карбида ванадия, расположенного возле границы слой-основа. Такое распределение элементов в диффузионном слое обусловлено тем, что ванадий является более сильным карбидообразующим элементом. В карбиде хрома микротвердостью 18 ГПа растворено железо матрицы ( $\approx 28$  вес.%) и ванадий ( $\approx 6$  вес. %). Микрорентгеноспектральный

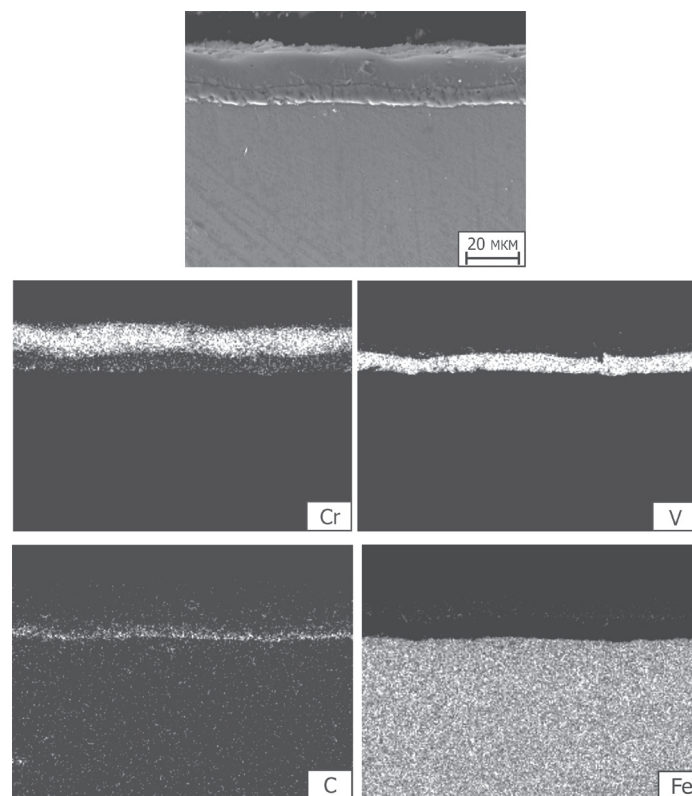


Рис. 2. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 2 (в характеристическом излучении хрома, ванадия, углерода, железа)



анализ зафиксировал в карбиде ванадия присутствие хрома в количестве  $\approx 8$  вес. %. Данное содержание хрома приводит к снижению микротвердости карбида ванадия до значения 16 ГПа. Износостойкость образцов после насыщения в данном составе незначительно превышает износостойкость образцов после хромирования в составе № 1.

После обработки в составе № 3 происходит увеличение толщины участка карбида ванадия по сравнению с составом № 2. Диффузионный слой состоит из участка карбида ванадия и тонкой кромки карбида хрома на внешней стороне. Увеличение составляющей карбида ванадия приводит к повышению износостойкости.

При насыщении в составе № 4 (рис. 3), показавшем близкие к максимальным значения износостойкости, формируется диффузионный слой на основе карбида ванадия, легированный хромом в количестве  $\approx 3$  вес. %. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что содержание ванадия соответствует карбиду типа VC. Микротвердость составляет 25 ГПа.

При насыщении в составе № 5 (рис. 4) диффузионный слой имеет двухслойную структуру.

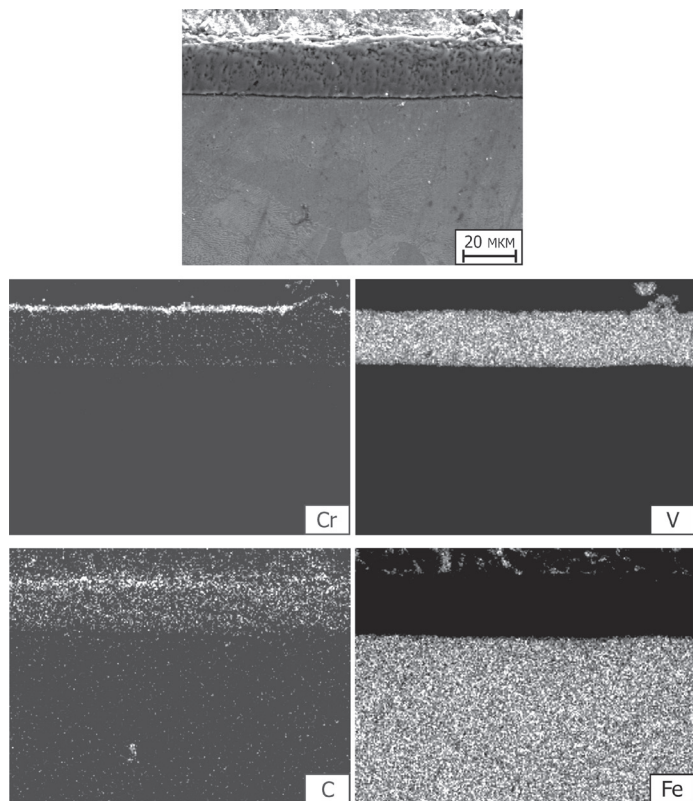


Рис. 3. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 4 (в характеристическом излучении хрома, ванадия, углерода, железа)

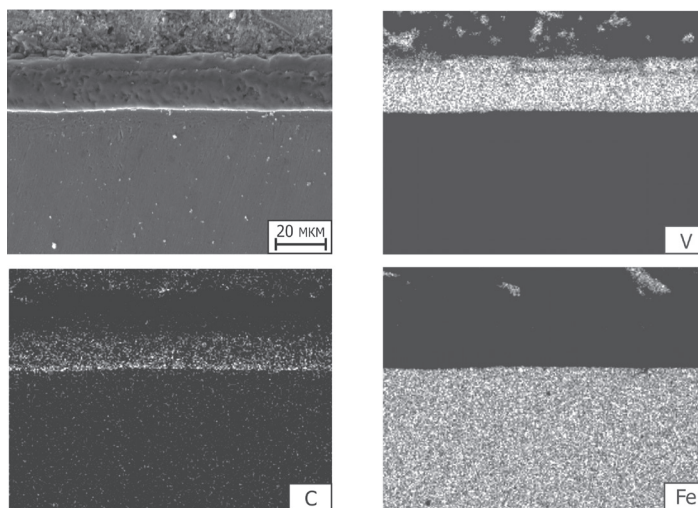


Рис. 4. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 5 (в характеристическом излучении ванадия, углерода, железа)

Согласно фазовой диаграмме ванадий образует с углеродом два карбида: VC и  $V_2C$ . Микротвердость полукарбида ванадия, сформированного на наружной стороне слоя, составляет 20 ГПа, а микротвердость монокарбида, находящегося под ним – 27 ГПа. Наличие полукарбида ванадия с пониженной микротвердостью приводит к снижению износостойкости слоя. Отрицательную роль играет слишком высокая микротвердость монокарбида ванадия, приводящая к выкрашиванию слоя.

## Выводы

Проведены процессы диффузионного насыщения стали У7 в порошках ферросплавов при их различных соотношениях. С помощью метода симплекс-планирования выявлена область оптимальных составов порошковой среды с соотношением 24...25 % феррохрома и 75...76 % феррованадия, ХТО в которой повышает износостойкость при трении скольжения без смазки стали У7 в 22,2...22,4 раза по сравнению с состоянием после закалки и низкого отпуска. Установлено, что оптимизированный слой состоит из легированного хромом карбида VC с микротвердостью 25 ГПа. Повышение износостойкости в условиях трения скольжения без смазки многокомпонентных карбидных слоев обусловлено преобладанием в диффузионном слое карбидов ванадия с высокой микротвердостью. Снижение уровня микро-

твердости по сравнению с однокомпонентным насыщением ванадием (27 ГПа) оказывает благоприятное воздействие на уровень износостойкости. Это обусловлено тем, что высокотвердая фаза под действием истирающей нагрузки выкрашивается.

### Список литературы

1. Самсонов Г.В., Упадхья Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 456 с.
2. Comparison of mechanical properties of boronized and vanadium carbide coated AISI 1040 steels / A. Calik, F. Taylan, O. Sahin, N. Ucaf // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. – 2009. – Vol. 16. – P. 326–330.
3. Surface modification of the X40CrMoV5-1 steel by laser alloying and PVD coatings deposition / L.A. Dobrzanski, E. Jonda, K. Lukaszewicz, K. Labisz, A. Klimpel // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2008. – Vol. 27, iss. 2. – P. 179–182.
4. Dobrzanski L.A., Jonda E., Labisz K. Structure and properties of surface layer of hot-work tool steels alloyed using high power diode laser // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2009. – Vol. 37, iss. 2. – P. 617–621.
5. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces / E.I. Meletis, X. Nie, F.L. Wang, J.C. Jiang // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 150, iss. 2–3. – P. 246–256. – doi: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3.
6. Electron-beam boriding of low-carbon steel / A.A. Novakova, I.G. Sizov, D.S. Golubok, T.Yu. Kiseleva, P.O. Revokatov // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2004. – Vol. 383. – P. 108–112. – doi: 10.1016/j.jallcom.2004.04.017.
7. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
8. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
9. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – № 8. – С. 48–50.
10. Шматов А.А. Моделирование процесса формирования карбидного слоя при диффузионном хромо-ванадировании стали У8 // *Вестник Полоцкого государственного университета*. – 2011. – № 11: Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – С. 113–123.
11. Исследование процесса диффузионного насыщения в смеси, содержащей оксид ванадия и алюминий / В.А. Бутуханов, А.Д. Грешилов, Б.Д. Лыгденов, О. Галаа // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 1-1. – С. 51–55.
12. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. – М.: МИСиС, 1970. – 106 с.
13. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. – М.: ДеЛи, 2005. – 296 с. – ISBN 5-94343-096-2.
14. Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. Диффузионные карбидные покрытия на стали У8А // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 414–418.
15. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Локутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндарчук. – Киев: Техніка, 1991. – 168 с.

### OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 80–86

### The effect of powder mixtures composition on the structure and properties of carbide diffusion layers

Butukhanov V.A., Engineer, e-mail: butuhanov\_vyacheslav@mail.ru

Lygdenov B.D., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lygdenov59@mail.ru

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

### Abstract

Thick-walled cylinders ( $D/d \geq 2$ ) constitute a large group of parts with precise small diameter holes ( $d = 1 \dots 10$  mm). Improvement of surface finish and accuracy of small diameter holes is an actual task and requires the development of new methods of processing and cold expansion is one of the most effective methods of finishing and hardening of holes in such parts. Along with high productivity, cold expansion helps to increase accuracy, improve surface roughness, considerably work-harden surface layer and generate favorable compressive residual stresses. However, residual stresses generated during cold expansion of parts such as thick-walled cylinders can be undesirably high in some cases.

It is supposed that in order to maintain high accuracy of holes and to reduce residual stresses after cold expansion of thick-walled cylinders, which undergo throughout plastic deformations, it is needed to perform axial plastic compression with subsequent cold expansion with small interferences. To test the hypothesis, the accuracy of holes as well as hoop, radial and axial residual stresses in cylinders made of steel grade 50 (0,5 % C, HB 2170...2290 MPa) with hole diameter  $d = 5$  mm, outer diameter  $D = 15$  and length  $L = 30$  mm by Sachs method is studied. It is found that double-cycle cold expansion with total interference  $a_{\Sigma}/d = 5,1$  % generates hoop residual stresses with largest absolute value equal to 284 MPa, which, after plastic compression with strain  $\Delta L/L$  equal to 0.5% and 1% and single-cycle cold expansion with interference  $a/d = 0,9$  %, changed to 177 MPa. It is shown that high hole accuracy (IT7) achieved through double-cycle expansion remained at the same high level after plastic compression and single-cycle expansion.

### Keywords

thick-walled cylinders, cold expansion, plastic compression, residual stresses

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-80-86

### References

1. Samsonov G.V., Upadkhaya G.Sh., Neshpor V.S. *Fizicheskoe materialovedenie karbidov* [Physical materials science of carbides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 456 p.
2. Calik A., Taylan F., Sahin O., Ucaf N. Comparison of mechanical properties of boronized and vanadium carbide coated AISI 1040 steels. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2009, vol. 16, pp. 326–330.
3. Dobrzanski L.A., Jonda E., Lukaszewicz K., Labisz K., Klimpel A. Surface modification of the X40CrMoV5-1 steel by laser alloying and PVD coatings deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2008, vol. 27, iss. 2, pp. 179–182.
4. Dobrzanski L.A., Jonda E., Labisz K. Structure and properties of surface layer of hot-work tool steels alloyed using high power diode laser. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, vol. 37, iss. 2, pp. 617–621.
5. Meletis E.I., Nie X., Wang F.L., Jiang J.C. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 150, iss. 2–3, pp. 246–256. doi: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3
6. Novakova A.A., Sizov I.G., Golubok D.S., Kiseleva T.Yu., Revokatov P.O. Electron-beam boriding of low-carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 383, pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jallcom.2004.04.017
7. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenitseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121
8. Voroshnin L.G., Mendeleva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical-thermal treatment]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p.
9. Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A. Intensifikatsiya protsessov khimiko-termicheskoi obrabotki metallov [Intensification of metals thermochemical treatment]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2008, no. 8, pp. 48–50.
10. Shmatov A.A. Modelirovanie protsessa formirovaniya karbidnogo sloya pri diffuzionnom khromovanadirovani stali U8 [Process modulation of forming diffusion Cr-V carbide coating on steel U8]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Promyshlennost'. Prikladnye nauki – Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*, 2011, no. 11, pp. 113–123. (In Russian)
11. Butukhanov V.A., Greshilov A.D., Lygdenov B.D., Galaa O. Issledovanie protsessa diffuzionnogo nasyshcheniya v smesi, sodержashchei oksid vanadiya i alyuminii [Study of diffusion saturation in a mixture of vanadium oxide and aluminum]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2012, no. 1-1, pp. 51–55.

12. Novik F.S. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov v metallovedenii* [Mathematical methods for design of experiments in metal science]. Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys Publ., 1970. 106 p.
13. Grachev Yu.P., Plaksin Yu.M. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimenta* [Mathematical methods of design of experiment]. Moscow, DeLi Publ., 2005. 296 p. ISBN 5-94343-096-2
14. Butukhanov V.A., Lygdenov B.D. Diffuzionnye karbidnye pokrytiya na stali U8A [Diffusion carbide coatings on steel with 0,8 percent of carbon]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2016, no. 3, pp. 414–418.
15. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindarchuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coatings]. Kiev, Tehnika Publ., 1991. 168 p.

**Article history:**

Received 25 April 2016

Revised 10 May 2016

Accepted 15 May 2016