

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669.15, 621.785.5

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.014

ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ БОРИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**Василий Николаевич Корнопольцев^{1†}, Степан Алексеевич Лысых²,
Александр Станиславович Милонов³**

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, 670047, Улан-Удэ, Россия

^{2,3} Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, 670047, Улан-Удэ, Россия

¹ kompo@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>

² lysyh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

³ terwer81@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7397-3581>

Аннотация. В работе представлены сравнительные исследования структуры, микротвердости, коэффициента диффузии и пластичности борированного и боромедненного слоев, полученных на низкоуглеродистой стали Ст3 за время выдержки 3, 4 и 5 ч при помощи разработанного совмещенного твердофазного метода с использованием высокотемпературного синтеза насыщающих элементов из окислов бора и меди в процессе термической обработки (ТО), что приводит к интенсификации процесса легирования поверхности железоуглеродистых сплавов (ЖУС). При чистом борировании в процессе химической термообработки (ХТО) формирование покрытия происходит по классическому варианту с образованием слоя со структурой игольчатые кристаллиты, ориентированные от поверхности вглубь металла. После 5-ти часовой обработки формируется двухфазное покрытие из высшего бориды FeB с микротвердостью 21-22 ГПа и расположенного под ним слоя низшего бориды Fe₂B с микротвердостью 18-19 ГПа. Толщина слоя высшего бориды составляет до трети от общей протяженности борированного покрытия. Максимальная длина игл для борирования составила 120 мкм. Структура боромедненного покрытия также имеет структуру игольчатых кристаллитов, но отличается более плотной упаковкой и большей длиной игл – до 200 мкм. При боромеднении устанавливается положительный градиент роста микротвердости от поверхности вглубь слоя с максимальной величиной 18-18,5 ГПа на расстоянии 10...20 % от поверхности от общей толщины покрытия. Коэффициент диффузии бора при наличии в грануле окиси меди увеличивается до 4-х раз, определенный расчетом и уравнениями, полученными при помощи программного обеспечения Excel. Величина хрупкости $\epsilon_{пред}$ для борирования составила 1,25-1,27, для боромеднения – 2,21-2,42, что оценивается баллами хрупкости: для борирования – 3, для боромеднения – 1. Наличие окиси меди в реакционной грануле способствует диффузии бора вглубь ЖУС с формированием фазы из низшего бориды железа, что положительно сказывается на финишной обработке и эксплуатации обрабатываемых деталей.

Ключевые слова: борирование, боромеднение, пластичность, коэффициент диффузии, структура, микротвердость.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 0273-2021-0007, № 0270-2021-0001).

Для цитирования: Корнопольцев В.Н., Лысых С.А., Милонов А.С. Повышение пластичности боридного покрытия на низкоуглеродистой стали // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 546–553. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.014.

Original article

INCREASING THE PLASTICITY OF BORIDE COATING ON LOW CARBON STEEL

Vasily N. Kornopol'tsev^{1†}, Stepan A. Lysykh², Alexandr S. Milonov³¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Sakhyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia^{2,3} Institute of Physical Materials Science SB RAS, Sakhyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia¹ kompo@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>² lisyh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>³ terwer81@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7397-3581>

Abstract. The paper presents a comparative study of the structure, microhardness, diffusion coefficient and plasticity of borated and boron-copper layers obtained on low-carbon steel St3 using the developed combined solid-phase method for saturating the steel surface using high-temperature synthesis of saturating elements from boron and copper oxides during heat treatment (HT) in reactive granules in which aluminum is used as an oxide reducing agent. The exothermic reaction of the simultaneous reduction of boric anhydride obtained from dehydrated boric acid and copper oxide leads to an intensification of the process of alloying the iron-carbon alloys (ICA) surface. In pure boriding using the reduction reaction of boric anhydride in the process of chemical heat treatment (CHT), the coating is formed according to the classical version with the formation of a layer with the structure of acicular crystallites oriented from the surface into the depth of the metal. After 5-hour treatment, a two-phase coating is formed from a higher FeB boride with a microhardness of 21-22 GPa and an underlying layer of a lower Fe₂B boride with a microhardness of 18-19 GPa. The thickness of the higher boride layer is up to a third of the total length of the borated coating. The maximum length of needles for boriding was 120 μm. The structure of the boron-copper coating also has the structure of acicular crystallites, but differs in denser packing and greater thickness, which reaches 200 μm. When boron-copper plating, a non-standard distribution of microhardness along the length of the layer was established. There is a positive gradient of microhardness growth from the surface deep into the layer with a maximum value of 18-18.5 GPa at a distance of 20-30 % from the surface of the total coating thickness. The diffusion coefficient of boron in the presence of copper oxide in the granule increases up to 4 times, determined by the calculation and equations obtained using the Excel software. The brittleness value ϵ_{lim} for boron plating was 1.25-1.27, for boron-copper plating – 2.21-2.42, which is estimated by brittleness points in for boron plating – 3, for boron-copper plating – 1. The presence of copper oxide in the reaction granule contributes to the diffusion of boron into depth of the ICA with the formation of a phase from the lower iron boride, which has a positive effect on the finishing and operation of the machined parts.

Keywords: boriding, boron-copper plating, plasticity, diffusion coefficient, structure, microhardness.

Acknowledgments: The work was supported by the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 0273-2021-0007, No. 0270-2021-0001).

For citation: Kornopol'tsev, V. N., Lysykh, S. A. & Milonov, A. S. (2022). Increasing the plasticity of boride coating on low carbon steel. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 546–553. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.014.

Введение

Поверхностное легирование деталей машин и механизмов, изготовленных из недорогих железоуглеродистых сплавов, остается одним из перспективных методов снижения производственных и эксплуатационных затрат при создании техники.

Для того, чтобы максимально повысить износостойкость различных деталей из недорогих ЖУС (втулки, опоры, ролики и т.п.) внимание привлекают методы диффузионного насыщения поверхности ЖУС различными химическими элементами, в частности бором [1, 2]. При этом, оцениваются такие преимущества борирования как универсальность методов с

получением одной из самых высоких показателей микротвердости, толщины покрытий и повышения стойкости к истиранию с низкой склонностью к холодной сварке (схватыванию). Для более широкого использования борирования в мировой практике сегодня большое внимание уделяется повышению пластичности боридных покрытий с применением различных методов борирования [3-8].

Во многом этот вопрос решается применением комплексного метода насыщения поверхности ЖУС бором с другими химическими элементами твердофазным методом [9-11]. В наших предыдущих работах разработан смещенный твердофазный метод насыщения поверхности ЖУС бором с соединениями меди

[12-15]. Порошковые смеси включают в свой состав реакционноспособные гранулы из обезвоженной борной кислоты, окиси меди и алюминия, как восстановителя этих окислов. Установлено, что в отличие простого дополнения в составы для борирования окиси меди, введение ее в состав гранул с использованием экзотермической реакции восстановления окислов непосредственно в процессе термической обработки наблюдается увеличение толщины боридных покрытий.

Целью данной работы стало дополнительное исследование свойств боридных покрытий, полученных на стали Ст3 (коэффициент диффузии, параметры пластичности).

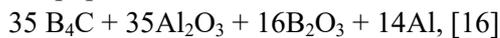
Материалы и методы

В качестве образцов использована сталь Ст3.

Процесс диффузионного насыщения проводился твердофазным методом в герметичном контейнере установкой контейнера в разогретую до рабочей температуры муфельную печь SNOL8,2/1100 с регулятором температуры Е5СК-Т. Стабильность температуры в установленном тепловом режиме ± 2 град. Диффузионное насыщение проводилось при температуре 1120 К в течение 3-х, 4-х и 5-ти часов с использованием в процессе ХТО экзотермической реакции алюмотермического восстановления окислов насыщающей смеси.

Состав насыщающей смеси имел следующее процентное содержание компонентов (масс. %):

– борирование



– боромеднение



В качестве активатора использован NaF в количестве 2-3 масс. % от массы насыщающей смеси.

Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе «Neophot-21».

Для определения коэффициента диффузии варьировалось время выдержки образцов в печи в течение 3, 4 и 5 часов.

Коэффициент диффузии D определен по следующей методике. Так как процесс насыщения проводится в герметичном контейнере с убывающей концентрацией насыщающего элемента за счет его диффузии в стальную основу, а также изменением концентрацией диффунди-

рующего элемента по протяженности диффузионного покрытия, процесс диффузии удобнее описывать при помощи метода расчета параметров диффузии из непостоянного источника. При этом коэффициент диффузии определяется по формуле [19]:

$$D = X^2 / 2t, \quad (1)$$

где X – толщина диффузионного слоя, м; t – время диффузионного процесса, с.

Для оценки хрупкости слоев использовали напряжение скола и предельную деформацию, которую оценивали с помощью испытания на индуцированное разрушение методом микровдавливания по Виккерсу на разных расстояниях отпечатка по толщине слоя бориды железа и определили по формуле Скуднава В.А.:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = D_{\text{отп}} / L_{\text{тр}}, \quad (2)$$

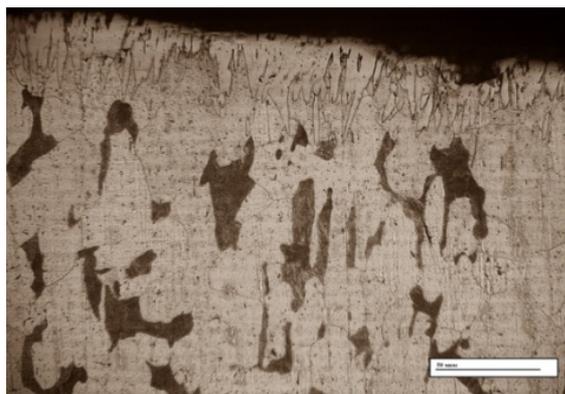
где, $D_{\text{отп}}$ – диагональ отпечатка; $L_{\text{тр}}$ – длина трещины между отпечатками.

Микротвердость и оценку хрупкости покрытий проводили на образцах после 5-ти часовой обработки. Для испытаний использовали микротвердомер ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н и 1,5 Н.

Результаты и их обсуждение

На серии рисунков 1 и 2 представления фотографии поперечных шлифов стали Ст3 после 3-х, 4-х, и 5-ти часовой выдержки при борировании и боромеднении.

Как видно из рис.1, при поверхностном насыщении стали Ст3 при чистом борировании формирование покрытия происходит по классическому варианту с образованием слоя со структурой игольчатых кристаллитов, ориентированных от поверхности вглубь металла. Причем, игольчато-кристаллическая структура зарождается уже при 3-х часовой термообработке. После постепенного обогащения поверхности легируемым элементом с увеличением времени выдержки наблюдается постепенный рост игольчатых кристаллов вглубь металла с более компактной упаковкой в поверхностном слое. Максимальная величина боридных игл после 5-ти часовой выдержки достигает 120 мкм, что на 15-20 % превышает борирование из карбида бора при тех же режимах ТО [1-3, 16]. При этом на поверхности формируется двухфазное покрытие из высшего бориды железа FeB с микротвердостью 21-22 ГПа и расположенным под ним слое низшего бориды Fe₂B с микротвердостью 18-19 ГПа. По протяженности слой высшего бориды составляет до трети от общей толщины покрытия.



а)



б)



в)

Рис.1. Диффузионные слои на поверхности стали Ст3 после борирования: а) 3 ч ($\times 600$), б) 4 ч ($\times 400$), в) 5 ч ($\times 400$)

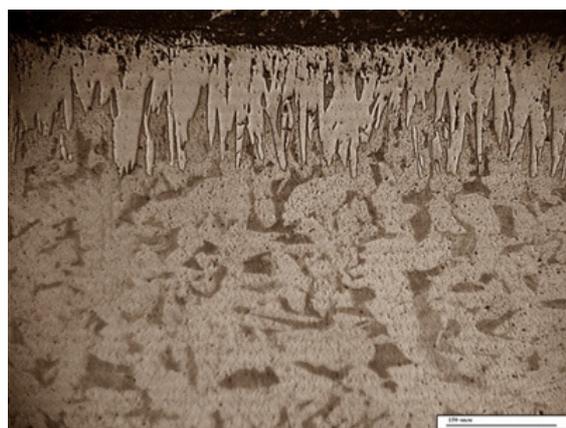
Fig.1. Diffusion layers on the surface of steel St3 after boriding; а) 3 h ($\times 600$), б) 4 h ($\times 400$), в) 5 h ($\times 400$)

Как видно из рис.2а, при наличии в насыщающей смеси продуктов восстановления алюминием окиси меди образующийся при 3-х часовой обработке диффузионный слой имеет отличительное строение. В отличие от «классического» игольчатого строения боридного слоя формируется сплошной слой, при котором бор диффундирует вглубь металла по кристаллам, и

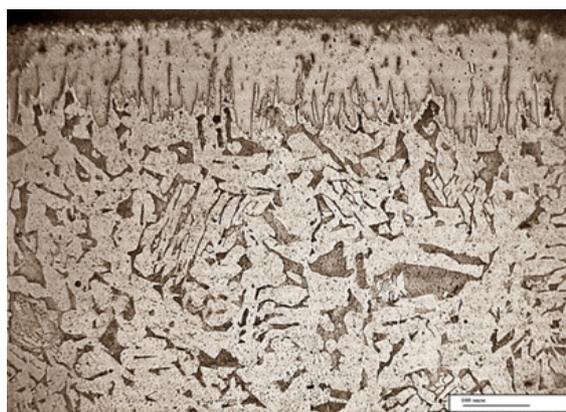
имеет хлопьевидное строение с образованием зародышей кристаллизации боридов железа. При 3-х часовой выдержке наблюдается существенная разница по толщине покрытия боромедненного слоя, которая в 2 раза превышает борированный, представленный для сравнения.



а)



б)



в)

Рис.2. Диффузионные слои на поверхности стали Ст3 после боромеднения: а) 3 ч ($\times 600$), б) 4 ч ($\times 400$), в) 5 ч ($\times 200$)

Fig.2. Diffusion layers on the surface of steel St3 after boron-copper plating: а) 3 h ($\times 600$), б) 4 h ($\times 400$), в) 5 h ($\times 200$)

Дальнейший рост боридного слоя с увеличением времени термообработки при боромеднении мало отличается от классического варианта, при котором происходит формирование слоя со структурой игольчатых кристаллитов.

Также наблюдается нестандартное распределение микротвердости по протяженности покрытия с положительным градиентом роста вглубь слоя с максимальной микротвердостью 18-18,5 ГПа на расстоянии 20-30 % от обработанной поверхности.

В работе [18] РФА анализом показано, что при введении медьсодержащих компонентов в насыщающую смесь в структуре боридного слоя наличие высшего борида ограничено поверхностным слоем в 20-25 мкм, тогда как образование низшего борида просматривается на глубину до 170-180 мкм.

Причем поверхностный слой, содержащий высший борид не имеет определенной структуры, присущей боридной игольчатой структуре. Поверхностный слой содержит большую концентрацию разориентированных кристаллов борида FeB, примеси низшего борида и железомедный сплав. Также установлено [15], что при повторных использованиях смесей для борирования с регенерацией свежими реакционными гранулами и насыщением смеси восстанавливаемой медью происходит трансформация боридного покрытия в сплошной слой с отсутствием игольчатой кристаллической структуры. При этом микротвердость покрытия снижается до 12 ГПа.

Таблица 1. Свойства диффузионных покрытий при различных способах борирования

Table 1. Properties of diffusion coatings for various boriding methods

Способ обработки	Уравнение коэффициента диффузии, $D \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$	$\varepsilon_{\text{пред}}$	Балл хрупкости
Борирование	$D = -0,185t^2 + 1,978t - 3,702$	1,25-1,27	3
Боромеднение	$D = -0,876t^2 + 8,377t - 15,25$	2,21-2,42	1

В таблице 1 также представлены данные расчетов предельной деформации боридных покрытий при борировании и боромеднении. Результаты расчетов показывают, что предельная деформация при разработанном методе боромеднения увеличивается более чем в 2 раза, и более чем в четыре раза увеличивается коэффициент диффузии.

Сравнивая полученные расчетные данные с работами [1, 9-11, 20, 21] наблюдается явное преимущество. При использовании совмещен-

ного метода ТО в порошковых смесях с применением восстановления окислов экзотермическим способом в процессе ТО возможно ожидать образование в герметичном контейнере насыщенной атмосферы легирующих компонентов с повышенной химической активностью. Раскрытие влияние компонентов меди в насыщающей смеси на рост диффузионного покрытия и формирование преимущественно покрытия из низшего борида является нашими дальнейшими исследованиями.

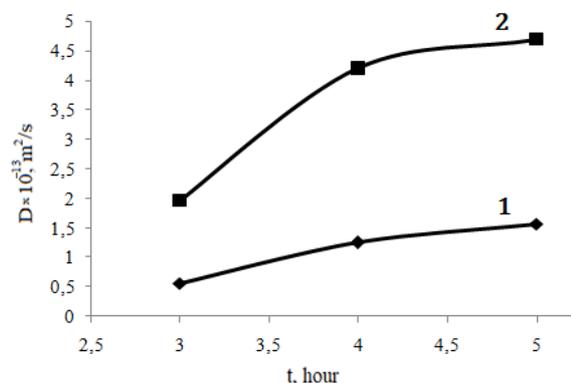


Рис.3. Графическая зависимость коэффициента диффузии бора в сталь Ст3 от продолжительности термообработки по разработанному методу: 1 – борирование, 2 – боромеднение

Fig.3. Graphical dependence of the diffusion coefficient of boron in steel St3 on the duration of heat treatment according to the developed method: 1 – boron plating, 2 – boron-copper plating

Используя программное обеспечение Excel коэффициент диффузии в зависимости от времени ТО с величиной достоверности аппроксимации $R^2 > 0,95$ описываются полиномиальной кривой, уравнения которых представлены в таблице 1.

Выводы

Дополнительными исследованиями определены коэффициенты диффузии бора и хрупкость боридных покрытий на стали Ст3 при использовании разработанных насыщающих смесей для твердофазного метода легирования ЖУС. Так, величина хрупкости $\epsilon_{\text{пред}}$ для борирования составила 1,25-1,27, для боромеднения – 2,21-2,42, что оценивается баллами хрупкости в для борирования – 3, для боромеднения – 1.

Использование экзотермической реакции восстановления окислов бора и меди в процессе ТО приводит к интенсификации процесса легирования поверхности ЖУС. Коэффициент диффузии бора в поверхность низкоуглеродистой стали увеличивается до 4-х раз, что определено сравнительными показателями толщины покрытия и уравнениями, полученными при помощи программного обеспечения Excel.

Установлено нестандартное для боридного покрытия распределение микротвердости по протяженности слоя. При боромеднении наблюдается положительный градиент роста микротвердости от поверхности вглубь слоя с максимальной величиной 18-18,5 ГПа на расстоянии 5-10 % от поверхности от общей толщины покрытия.

Наличие окиси меди в реакционной грануле способствует диффузии бора вглубь ЖУС с формированием фазы из низшего борида железа, что положительно сказывается на финишной обработке и эксплуатации обрабатываемых деталей.

Список литературы

1. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск, 1981. 205 с.
2. Гурьев А.М., Грешилов А.Д., Лыгденов Б.Д. Диффузионное борирование – перспективное направление в поверхностном упрочнении изделий из сталей и сплавов // Ползуновский альманах. 2010. № 1. С. 80–88.
3. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
4. Üçişik A.H., Bindal C. Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels // Surf. Coat. Technol. 1997. V. 94–95. P. 561–565.
5. Kulka M., Makuch N., Piasecki A. Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe₂B iron borides produced

by gas boriding of Armco iron // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 325. P. 515–532.

6. Campos-Silva I., Flores-Jiménez M., Rodríguez-Castro G., Hernández-Sánchez E., Martínez-Trinidad J., Tadeo-Rosas R. Improved fracture toughness of boride coating developed with a diffusion annealing process // Surf. Coat. Technol. 2013. V. 237. P. 429–439.

7. Sen S., Ozbek I., Sen U., Bindal C. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel // Surf. Coat. Technol. 2001. V. 135. P. 173–177.

8. Hernández-Sánchez E., Rodríguez-Castro G., Meneses-Amador A., Bravo-Bárceñas D., Arzate-Vazquez I., Martínez-Gutiérrez H., Romero-Romo M., Campos-Silva I. Effect of the anisotropic growth on the fracture toughness measurements obtained in the Fe₂B layer // Surf. Coat. Technol. 2013. V. 237. P. 292–298.

9. Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Мэй Ш. Особенности микроструктуры стали Ст3 после совмещенного диффузионного насыщения поверхности бором, хромом и титаном // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13, № 2. С. 230–232.

10. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали Ст3 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9, № 1. С. 86–88.

11. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Бектасова Г.С. Диффузия бора в стали 20 // Известия АлГТУ. Физика. 2020. Т. 111, № 1. С. 58–61.

12. Лысых С.А., Хараев Ю.П., Корнопольцев В.Н., Бутуханов В.А. Исследование формирования диффузионных слоев на стали 20 при одновременном насыщении бором и медью // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 9. С. 56–60.

13. Лысых С.А., Хараев Ю.П., Корнопольцев В.Н., Чжун Хэ Сяо, Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. Формирование диффузионных слоев и исследование шероховатости при комплексном насыщении поверхности стали 5ХНМ бором и медью // Ползуновский Вестник. 2020. № 3. С. 77–82.

14. Корнопольцев В.Н., Лысых С.А., Гурьев А.М. Влияние окиси меди на свойства и структуру боридных покрытий // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 196–202.

15. Корнопольцев В.Н., Мосоров В.И. Получение комплексных боридных покрытий и исследование насыщающей способности смесей при повторных использованиях // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 403–411.

16. Корнопольцев В.Н. Интенсификация процессов борирования углеродистых сталей порошковыми смесями // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10, № 2. С. 266–271.

17. Способ и состав для боромеднения железоуглеродистых сплавов: пат. 2708020. МПК C23C 8/68; Рос. Федерация № 201846154; заявл. 25.12.2018; опубл. 03.12.2019, Бюл. № 34. 4 с.

18. Корнопольцев В.Н., Субанакоев А.К., Мосоров В.И. Исследования комплексного боридного покрытия физическими методами // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 412–418.

19. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд. МГУ, 1987. 75 с.

20. Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: boride layer growth kinetics // Acta Mater. 2005. V. 53. P. 2361–2368.

21. Jain V., Sundararajan G. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 149. P. 21–26.

Информация об авторах

В. Н. Корнопольцев – кандидат технических наук, научный сотрудник Байкальского института природопользования СО РАН.

С. А. Лысых – младший научный сотрудник Института физического материаловедения СО РАН.

А. С. Милонов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физического материаловедения СО РАН.

References

1. Voroshnin, L. G. (1981). Borirovaniye promyshlennykh staley i chugunov. Minsk. P. 205. (In Russ.).

2. Gur'yev, A. M., Greshilov, A. D. & Lygdenov, B. D. (2010). Diffuzionnoye borirovaniye – perspektivnoye napravleniye v poverkhnostnom uprochnenii izdeliy iz staley i splavov. *Polzunovskiy al'manakh*, 1, 80–88. (In Russ.).

3. Krukovich, M. G., Prusakov, B. A. & Sizov, I. G. (2010). Plastichnost' borirovannykh sloyev. M.: FIZMATLIT. P. 384. (In Russ.).

4. Üçışık, A. H. & Bindal, C. (1997). Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels. *Surf. Coat. Technol.*, (94–95), 561–565.

5. Kulka, M., Makuch, N. & Piasecki, A. (2017). Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe₂B iron borides produced by gas boriding of Armco iron. *Surf. Coat. Technol.*, (325), 515–532.

6. Campos-Silva, I., Flores-Jiménez, M., Rodríguez-Castro, G., Hernández-Sánchez, E., Martínez-Trinidad, J. & Tadeo-Rosas, R. (2013). Improved fracture toughness of boride coating developed with a diffusion annealing process. *Surf. Coat. Technol.*, (237), 429–439.

7. Sen, S., Ozbek, I., Sen, U. & Bindal, C. (2001). Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel. *Surf. Coat. Technol.*, (135), 173–177.

8. Hernández-Sánchez, E., Rodríguez-Castro, G., Meneses-Amador, A., Bravo-Bárceñas, D., Arzate-Vazquez, I., Martínez-Gutiérrez, H., Romero-Romo, M. & Campos-Silva, I. (2013). Effect of the anisotropic growth on the fracture toughness measurements obtained in the Fe₂B layer. *Surf. Coat. Technol.*, (237), 292–298.

9. Gur'yev, A. M., Ivanova, T. G., Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A. & Mey, Sh. (2016). Osobnosti mikrostruktury stali St3 posle sovmeshchennogo diffuzionnogo nasyshcheniya poverkhnosti borom, khromom i titanom. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(13), 230–232. (In Russ.).

10. Ivanov, S. G., Garmayeva, I. A. & Gur'yev, A. M. (2012). Osobnosti diffuzii atomov bora i khroma pri dvukhkomponentnom nasyshchenii poverkhnosti stali St3. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(9), 86–88. (In Russ.).

11. Shevchuk, E. P., Plotnikov, V. A. & Bektasova, G. S. (2020). Diffusion of boron in steel 20. *Izvestia AIGTU. Physics*, 1(111), 58–61. (In Russ.).

12. Lysykh, S. A., Kharayev, Yu. P., Kornopol'tsev, V. N. & Butukhanov, V. A. (2018). Issledovaniye formirovaniya diffuzionnykh sloyev na stali 20 pri odnovremennom nasyshchenii borom i med'yu. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, 9, 56–60. (In Russ.).

13. Lysykh, S. A., Kharayev, Yu. P., Kornopol'tsev, V. N., Chzhun, Khe Syao, Lygdenov, B. D. & Gur'yev, A. M. (2020). Formirovaniye diffuzionnykh sloyev i issledovaniye sherokhovatosti pri kompleksnom nasyshchenii poverkhnosti stali 5KHNМ borom i med'yu. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, 77–82. (In Russ.).
14. Kornopol'tsev, V. N., Lysykh, S. A. & Gur'yev, A. M. (2021). Vliyaniye okisi medi na svoystva i strukturu boridnykh pokrytiy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(18), 196–202. (In Russ.).
15. Kornopol'tsev, V. N. & Mosorov, V. I. (2014). Polucheniye kompleksnykh boridnykh pokrytiy i issledovaniye nasyshchayushchey sposobnosti smesey pri povtornykh ispol'zovaniyakh. *Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii*, 1, 403–411. (In Russ.).
16. Kornopol'tsev, V. N. (2013). Intensifikatsiya protsessov borirovaniya uglirodistykh staley poroshkovymi smesyami. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(10), 266–271. (In Russ.).
17. Sposob i sostav dlya boromedneniya zhelezouglerodistykh splavov: pat. 2708020. MPK S23S 8/68; Ros. Federatsiya No. 201846154; zayavl. 25.12.2018; opubl. 03.12.2019, Byul. No. 34. 4 s. (In Russ.).
18. Kornopol'tsev, V. N., Subanakov, A. K. & Mosorov, V. I. (2014). Issledovaniya kompleksnogo boridnogo pokrytiya fizicheskimi metodami. *Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii*, 1, 412–418. (In Russ.).
19. Urusov, V. S. (1987). Teoreticheskaya kristallohimiya. M.: Izd. MGU. P. 75. (In Russ.).
20. Yu, L. G., Chen, X. J., Khor, K. A. & Sundararajan, G. (2005). FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: boride layer growth kinetics. *Acta Mater.*, (53), 2361–2368.
21. Jain, V. & Sundararajan, G. (2002). Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. *Surf. Coat. Technol.*, (149), 21–26.

Information about the authors

V. N. Kornopol'tsev – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS.

S. A. Lysykh – Junior Researcher of the Institute of Physical Materials Science SB RAS.

A. S. Milonov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Institute of Physical Materials Science SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.11.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was received by the editorial board on 08 Nov. 22; approved after reviewing 18 Nov. 22; accepted for publication 25 Nov. 22.