

УДК 669-1:51-74:519.257

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ

ФИЛОНЕНКО Н.Ю.¹ к.ф.-м.н.,
БАСКЕВИЧ А.С.² к. ф.-м. н., с. н. с.

¹ кафедра медицинской физики и информатики, Государственное заведение «Днепропетровская медицинская академия МОЗ Украины», пл. Октябрьская, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 713-59-51, e-mail: natph@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

² . кафедра ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 8, Украина

Аннотация. Цель. Определить влияние предварительной пластической деформации (ПД) на структуру, механические свойства и процесс насыщения бором и углеродом низкоуглеродистой стали. **Методика.** В качестве материала для исследования была выбрана низкоуглеродистая сталь, которую предварительно отжигали при температуре 1123 К на протяжении пяти часов, а затем деформировали в условиях квазистатической нагрузки. Исследовали фазовый состав, физические свойства слоя после предварительной деформации образцов со степенью 0-40 % и при различном содержании карбида бора в углеродсодержащей насыщающей среде. **Результаты.** Исследовано влияние предварительной пластической деформации и содержания карбида бора в насыщающей среде на структуру и фазовый состав слоя. Проведенный комплекс исследований показал, что на формирование фазового состава слоя большое влияние оказывает не только содержание карбида бора в насыщающей среде, но и предварительная пластическая деформация. **Научная новизна.** Выявлено, что предварительная пластическая деформация и наличие бора в среде увеличивает диффузионную активность углерода. **Практическая значимость.** Полученные закономерности диффузионного насыщения поверхности низкоуглеродистой стали позволяют получить диффузионные слои с улучшенными физико-химическими свойствами.

Ключевые слова: низкоуглеродистый сплав, фазовый состав; моноборид FeB, борид железа Fe₂B; бороцементит Fe₃(CB), кубический борокарбид Fe₂₃(CB)₆.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ДИФУЗІЙНОГО ШАРУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД УМОВ ОБРОБКИ

ФІЛОНЕНКО Н.Ю.¹ к.ф.-м.н.,
БАСКЕВИЧ О.С.² к. ф.-м. н., с. н. с.

¹ кафедра медичної фізики та інформатики, Державний заклад «Дніпропетровська медична академія МОЗ України», пл. Жовтнева, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 713-59-51, e-mail: natph@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

² науково-дослідній лабораторії хімії і технології порошкових матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ, пр. Гагарина, 8, Україна

Анотація. Мета. З'ясувати вплив попереднього пластичного деформування (ПД) на структуру, фазовий склад, механічні властивості шару та процес насичення бором та карбоном низьковуглецевої сталі. **Методика.** В якості матеріалу для дослідження була обрана низьковуглецева сталь, яку попередньо піддавали відпалу при температурі 1123 К на протязі п'яти годин, а потім деформували за умов квазистатичного навантаження. Досліджували фазовий склад, фізичні властивості шару після попередньої пластичної деформації зі ступенем 0-40 % та при різному вмісті карбиду бору в насичуючому середовищі. **Результати.** Досліджено вплив попередньої пластичної деформації та вмісту карбиду бору в насичуючому середовищі на структуру та фазовий склад шару. Проведений комплекс досліджень показав, що на формування фазового складу шару після насичення в середовищі, що містить бор, великий вплив має не тільки вміст карбиду бору в середовищі, але й попередня пластична деформація. **Наукова новизна.** Виявлено, що попередня пластична деформація та наявність бору в середовищі збільшує дифузійну активність карбону. **Практична значимість.** Отримані закономірності дифузійного насичення поверхні низьковуглецевої сталі дозволяють отримати дифузійні шари з покращеними фізико-хімічними властивостями.

Ключові слова: низьковуглецевий сплав, фазовий склад; моноборид FeB, борид заліза Fe₂B; бороцементит Fe₃(CB), кубічний борокарбід Fe₂₃(CB)₆.

THE PHASE COMPOSITION OF THE DIFFUSION LAYER, DEPENDING ON CONDITIONS PROCESSING

Filonenko N. Yu ^{1*}, PhD
 Baskevich A. S. ², PhD

^{1*}Filonenko Nataliya. Yurevna, PHD, State Education «Dnepropetrovsk Medical Academy of Ministry of Health of Ukraine» (PSDMA), Lecturer, Department of Biophysics and Informatics, Dnipropetrovsk, Ukraine Tel. +38 (093) 936-95-27, e-mail: natph@mail.ru

²Baskevich Aleksandr S., PHD, Senior Fellow, Scientific research laboratory of chemistry and technology of powder materials, State Higher Education Establishment «Ukraine State chemistry and technology university», Dnipropetrovsk, Ukraine, Tel. +38 (095) 491-26-30, abaskevich@ukr.net

Annotation. Purpose. To determine the effect of the preliminary of plastic prestraining in the structure, mechanical properties and the process of saturation of the low-carbon boron alloy. **Methodology.** The material chosen for the study was low carbon steel, which is pre-annealed at 1223 K for five hours and then of plastic prestraining at a load conditions. The phase composition, physical properties of the layer after the samples deformation with a degree of 0-40% and with different contents of boron carbide in the saturating environment. **Findings.** Complex conducted studies have shown that the formation of the phase composition of the layer after saturation in a thickness of layer containing boron, is greatly influenced by not only the content of boron carbide in the layer, but also of the preliminary of plastic prestraining. At the same time, it is revealed that the plastic prestraining and boron diffusion increases the carbon activity. **Originality.** The steel structure is mounted and the phase depth of the diffusion zone depending on the boron carbide content of the layer and of the preliminary plastic prestraining. **Practical value.** These laws, which give a description of the structural components and the conditions of their formation allow to predict the mechanical properties of the layer.

Keywords: plastic prestraining, intensification of diffusion, boron cementation, Fe₂B iron boride, Fe₂₃(CB)₆ cubic boron carbide, Fe₃(CB) boron cementite.

Вступ

Незважаючи на практичне застосування методів насичення поверхні низьковуглецевих сталей залишається багато питань пов'язаних з механізмом структуроутворення в дифузійній зоні. Відомо, що в сплавах, які містять бор або на поверхні сплавів після борування відбувається утворення бористих та бормістячих фаз [1, 2], а також фаз з більш складною морфологією [3]. Однак вплив попередньої пластичної деформації та вмісту бору в насичуючому середовищі на структуру та фазовий склад шару вивчені не достатньо [4-6]. На підставі вище зазначеного, дослідження процесів формування структури в дифузійній зоні в залежності від умов насичення є актуальною задачею.

Мета

З'ясувати вплив попереднього пластичного деформування (ПД) на структуру, механічні властивості, процес насичення бором та карбоном низьковуглецевого сплаву.

Матеріал

Дослідження проводили на зразках зі сталі 25 розміром 30x30 mm, які попередньо піддавали відпалу при температурі 1123 K на протязі 5 годин, а потім деформували за умов квазістатичного навантаження на гідравлічній машині ПГ-100 зі швидкістю (10-3 sec-1) до значень відносної деформації 10, 25 і 40 %.

Методика і результати

Хіміко-термічну обробку зразків після попередньої деформації здійснювали порошковим

методом в твердому карбюризаторі з різним вмістом карбиду бора (2-20%) у контейнері з плавким затвором протягом п'яти годин при температурі 1223 К:

Фазовий склад сплавів визначали методом мікрорентгеноспектрального аналізу на мікроскопі JSM-6490, а також за допомогою оптичного мікроскопу «Неофот-21».

Рентгеноструктурний аналіз здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 в монохроматизованому Fe-K α випромінюванні. Фазовий склад та вміст бору і карбону в поверхневих шарах зразків визначали методом пошарового рентгеноструктурного та спектрального аналізів за стандартами (ДСТУ 2841-94) та за оригінальною методикою [7]. Мікротвердість різних фазових складових визначали на мікротвердомірі ПМТ-3 (ДСТ 9460-76).

Абразивний знос шарів визначали на установці для випробовування валкових і штампових матеріалів за схемою двох колодок із зусиллями притиску колодки 200 кг·с і швидкістю обертання 140-150 об/хв. Як еталон використовували зразки сталі 25.

При вмісті карбиду бора в насичуючому середовищі до 20 % на поверхні, попередньо відпаленого низьковуглецевого сплаву, утворюється дифузійний шар, що складається з шару монобориду FeB глибиною до 15 мкм та бориду Fe₂B – 30-40 мкм (рис. 1). Попередня пластична деформація цього сплаву приводить до утворення боридного шару з монобориду FeB глибиною до 20 мкм та фази Fe₂B глибиною 40-60 мкм. В підшару спостерігали появу незначне збільшення перлітної складової. По границям зерен перліту відбулося утворення боридів

Fe₂B та бороцементиту Fe₃(CB). Результати пошарового спектрального аналізу показали, що при збільшенні глибини дифузійної зони відбувається різке зменшення вмісту бору.

При зменшенні вмісту карбіду бора до 10% спостерігається утворення бориду Fe₂B на поверхні низьковуглецевого сплаву.

У відпаленому низьковуглецевому сплаві мікроструктура поверхні шару представлена боридами. Причому, голки бориду Fe₂B утворилися на поверхні зразка, та мали не щільну структуру. Глибина борованого шару склала 20-40 мкм (рис. 2). В зразках, які мали попередню пластичну деформацію спостерігали збільшення боридного шару (до 50 мкм) та перлітної складової в порівнянні з початковим зразком.

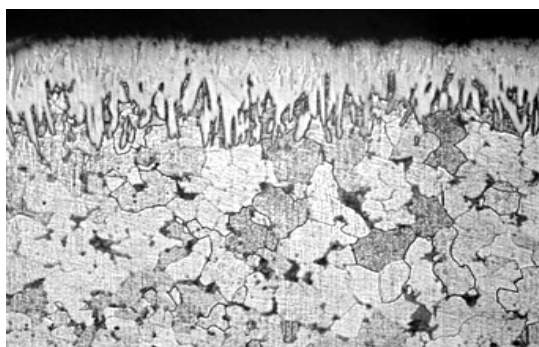


Рис. 1. Мікроструктура низьковуглецевого сплаву після насичення поверхні карбідом бору 20 % (мас.) в насичуючому середовищі (x500) / The microstructure of low-carbon alloy after saturation the surface boron carbide content of 20 % (wt.) in saturating medium

При вмісті карбіду бору 2-4 % в насичуючому середовищі на поверхні низьковуглецевої сталі утворюється дифузійна зона, яка має перлітну структуру, а борований шар відсутній.

У поверхневому шарі попередньо відпалених зразків на глибині 50 мкм вміст бору склав 0,01 % (мас.), а карбону 0,9 % (мас.).

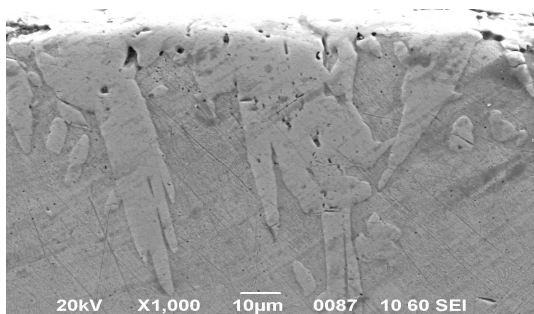


Рис. 2. Мікроструктура низьковуглецевого сплаву після насичення поверхні карбідом бору 10 % (мас.) в насичуючому середовищі (x1000) / The microstructure of low-carbon alloy after saturation the surface boron carbide content of 10 % (wt.) in saturating medium

При збільшенні глибини шару вміст бору різко зменшується за результатами пошарового спектрального аналізу. По межах перлітних зерен

спостерігали плоскогранної форми бориду Fe₂B, округлі включення бороцементиту Fe₃(CB), кубічного борокарбіду Fe₂₃(CB)₆. Крім того, після хімічного травлення поверхні зразків боровмісні фази відрізняються забарвленням. Так, борид Fe₂B жовтий, а бороцементит Fe₃(CB) ближчий до сірого. Рентгеноструктурний аналіз шару на глибині 450 мкм зафіксував такий фазовий склад: α-Fe, бороцементит Fe₃(CB), кубічний борокарбід Fe₂₃(CB)₆. На більшій глибині шару виявили перліт, α-фазу, цементит Fe₃C.

У низьковуглецевій сталі після попереднього пластичного деформування перліт у дифузійному шарі має більш дисперсну будову, чим попередньо відпалені зразки. При цьому, що вищий ступінь попереднього деформування, то більша дисперсність перліту.

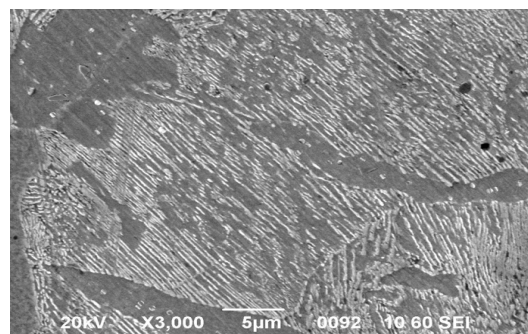


Рис. 3. Мікроструктура шару попередньо відпаленого зразка після насичення бором та карбоном на глибині 100 мкм / Microstructure for layer of preannealing specimen after casehardening with boron

Після насичення зразків, які мали попередню пластичну деформацію по межах перлітних зерен спостерігали виділення: плоскогранної форми бориду Fe₂B, округлі включення бороцементиту Fe₃(CB), кубічного борокарбіду Fe₂₃(CB)₆ (рис. 3). Зі збільшенням глибини шару ділянка має у своєму складі перліт, α-фазу, цементит Fe₃C. Глибина шару після попередньої пластичної деформації збільшується у порівнянні з попередньо відпаленими зразками.

Таблиця 1

Залежність глибини шару та відносної зносостійкості від виду попередньої обробки / Effect of prior processing on depth and relative wear resistance with boron layer

Ступінь деформатії, %	Вміст В ₄ С, % (мас.)	Глибина боридного шару, мкм		Глибина дифузійної зони, мкм	Відносна зносостійкість, %
		FeB	Fe ₂ B		
0	3	-	-	900	1,36
25		-		1600	1,59
0	10	-	25	400	1,33
25		-	40	520	1,37
0	20	15	40	55	1,38
25		20	60	95	1,35

Попередня пластична деформація зі ступенем 25 % низьковуглецевої сталі призводить до збільшення глибини шару, до більш активної дифузії атомів карбону та бору при насиченні поверхні зразків у порівнянні з попередньо відпаленими зразками з іншими ступенями пластичної деформації.

Таким чином, вміст карбіду бора в насичуючому середовищі та попередня обробка сплавів впливає на структуру та властивості дифузійного шару (табл. 1).

Щоб дослідити зміну структури шару після дифузійного насичення, його охолоджували та витримували за температури 1153 К впродовж однієї години. Вибір температури, до якої охолоджували, пов'язаний з тим, що при 1153 К у боровмісних сплавах зменшується об'ємна частка бориду Fe_2B в аустеніті [8]. Після витримки за температури 1153 К та охолодження на повітрі спостерігали зміну об'ємної частки і розмірів боровмісних фаз у шарі. При цьому присутність бориду Fe_2B не спостерігали. Шар був зміцнений дрібнодисперсними включеннями бороцементиту, розташованими в об'ємі перлітних зерен.

Завдяки дослідженням розробили спосіб, який дає змогу одержувати якісніші, однорідніші за структурою та зміцнені дрібнодисперсними борокарбідами покриття більшої товщини.

Бор більш активно взаємодіє з дефектами структури, ніж карбон, і може утворювати на дефектах структури надлишкові фази, що містять бор [8-11]. Таким чином, бор витісняє частково карбон з границь зерен аустеніту. В результаті насичення поверхні сталі по границях перлітних зерен спостерігали утворення не глобулярних включень цементиту, а дрібнодисперсні включення бороцементиту $Fe_3(CB)$. Крім того, відомо, що у цементиті Fe_3C атоми бору можуть заміщати до 80 % (ат.) атомів карбону, енергія Гіббса утворення бороцементиту $Fe_3(CB)$ менша за енергію Гіббса утворення цементиту Fe_3C , а також енергія зв'язку між атомами заліза та бору вища, ніж між атомами заліза та карбону [3, 12]. Легування бором сплавів збільшує об'ємну частку бороцементиту в сплаві та збільшує активність карбону [8]. Крім того, як відомо, попередня деформація змінює механізм

дифузії бору. Дифузія бору при насиченні поверхні сплавів після попередньої пластичної деформації здійснюється не тільки по границях зерен аустеніту, але й частково в об'ємі зерна аустеніту [13].

Таким чином, на підставі наведених фактів можна стверджувати, що бор впливає на процес дифузії карбону у твердому розчині γ -заліза та збільшує його дифузійну активність.

Результати

Проведений комплекс досліджень показав, що присутність бору в насичуючому середовищі та попередня пластична деформація інтенсифікують дифузію атомів карбону, дозволяють поліпшити механічні властивості дифузійного шару.

Наукова новизна та практична цінність

Виявлено, що попередня пластична деформація та наявність бору в середовищі збільшує дифузійну активність карбону.

Отримані закономірності дифузійного насичення поверхні низьковуглецевої сталі дозволяють отримати дифузійні шари з покращеними фізико-хімічними властивостями.

Висновки.

1. Проведений комплекс досліджень показав, що попередня пластична деформація за умов квазістатичного навантаження збільшує глибину дифузійного шару.

2. Наявність бору в насичуючому середовищі збільшує активність карбону та об'ємну частку бороцементиту $Fe_3(CB)$ в підшарку.

3. При вмісті понад 10 % карбіду бора в насичуючому середовищі призводить до формування шару боридів на поверхні низьковуглецевої сталі. Але для отримання суцільного та однорідного борованого шару не залежно від умов попередньої обробки матеріалів вміст карбіду бору в насичуючому середовищі повинен бути не менш ніж 20 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глухов В. П. Боридные покрытия на железе и сталях / В. П. Глухов. – Киев: Научная мысль, 1970. – 208 с.
2. Криштал М. А. Механизм диффузии в железных сплавах. / М. А. Криштал. – М.: Металлургия, 1972. – 398 с.
3. Дослідження впливу енергії зв'язку на утворення бормістячих фаз у сплавах системи Fe–B–C / О. Ю. Береза, Н. Ю. Філоненко, О. С. Баскевич // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13. – С. 968-973.
4. Авакумов Е. Г. Механические методы активации химических процесов / Е. Г. Авакумов – Новосибирск: Наука, 1986. – 306 с.
5. Кидин И. Н., Щербединский Г. В., Андрущечкин В. И. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода в аустените // Металловед. и термич. обработка металлов. – 1981. – № 12. – С. 26–29.
6. Влияние предварительной холодной деформации на цементацию стали / Ю. М. Лахтин, В. Д. Кальнер, В. К. Седуков, Т. А. Смирнова // Металловед. и термич. обработка металлов. – 1971. – № 12. – С. 22–27.
7. Твердохлебова С. В. Спектрометрия борсодержащих сплавов. // Вісник Дніпропетровського національного університету. Серія .фізика. Радіоелектроніка. – Д.: Вид-во ДНУ. – 2007. – Вип.. 14, № 12/1. – С. 100-104.

8. Effect of Plastic Prestraining of 25 Steel on the Diffusion Saturation of its Surface with Boron and Carbon / N. Yu. Filonenko, O. Yu. Bereza, S. B. Pilyaeva // *Materials Science*. – 2015. – 51(2). – pp. 172-179. DOI 10.1007/s11003-015-9825-9.
9. Гаврилова В. Г., Ткаченко И. Ф., Белосточный А. В. О типе растворения бора в аустените и его взаимодействии с дислокациями // *Металловед. и термич. обработка металлов*. – 1999. – № 4. – С. 55–57.
10. Бокштейн С. З. Диффузия и структура металлов. / С. З. Бокштейн – Москва: *Металлургия*, 1973. – 206 с.
11. Особливості боридних фаз у вуглецевих сталях, що містять бор / М. М. Новиков, І. М. Спиридонова, Н. Ю. Філоненко // *Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. – 2007. – № 3. – С. 525–531.
12. Філоненко Н. Ю. Дослідження термодинамічних функцій фаз, що містять бор системи Fe–B–C // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2011. – 12, № 2. – С. 370–374.
13. Влияние деформационного воздействия на диффузию бору в среднеуглеродистом сплаве / Н. Ю. Филоненко, Л. И. Федоренкова, И. М. Спиридонова // *Физика и техника высоких давлений*. – 2010. – 20, № 1. – С. 102–109.

REFERENCES

1. Glukhov V. P. Boridnie pokritiya na geleze i stalyax [Boride Coatings on Iron and Steels]. Kyiv: *Naukova Dumka*, 1970, 208p. (in Russian).
2. Krishtal M. A. Mechanism of Diffusion in Iron Alloys [Mechanism of Diffusion in Iron Alloys] (in Russian). Moscow: *Metallurgiya*, 1972, 398p.
3. Bereza O.Yu., Filonenko N. Yu., and Baskevych O. S. Doslidgenya vplyvy energii zvyazky na ytvorennya bormistyachix faz y splavax systemy Fe–B–C [Study of the influence of binding energy on the formation of boron-containing phases in alloys of the Fe–B–C system]. *Fiz. Khim. Tverd. Tila* – [Physics and chemistry of solid state], 2012, 13, pp. 968–973 (in Ukrainian).
4. Avakumov E. G. *Mechanicheskie metody aktivagii ximicheskix progressov* [Mechanical Methods for the Intensification of Chemical Processes] (in Russian), Novosibirsk: *Nauka*, 1986, 306 p.
5. Kidin I. N., Shcherbedinskii G.V., and Andryushechkin V. I. Vliyanie predvaritelnoy xolodnoy plasticheskoy deformatsii na diffyziu ygleroda v aystenite [Influence of cold plastic prestraining on the diffusion of carbon in austenite], *Metalloved. Term. Obrab. Met.* – [Metallurgy and heat treatment of metals], 1981, No. 12, pp. 26–29 (in Russian).
6. Lakhtin Yu. M., Kal’ner V. D., Sedukov V. K., and Smirnova T. A., Vliyanie predvaritelnoy xolodnoy deformatsii na gementagii stali [Effect of cold plastic prestraining on the cementation of steel], *Metalloved. Term. Obrab. Met.* – [Metallurgy and heat treatment of metals], 1981 No. 12, pp. 22–27 (in Russian).
7. Tverdokhlebova S. V. Spectrometry of the boron-containing alloys”, *Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu. Serija .fizika. Radioelektronika*, D.: Vid-vo DNU, 14, no. 12/1, pp. 100–104, 2007(in Russian).
8. Filonenko N. Yu., Bereza O. Yu., Pilyaeva S. B. Effect of Plastic Prestraining of 25 Steel on the Diffusion Saturation of its Surface with Boron and Carbon. *Materials Science*. 2015, 51(2), pp. 172-179. DOI 10.1007/s11003-015-9825-9.
9. Gavrilova V. G., Tkachenko I. F., and Belostochnyi A. V., O tipe rastvorenija bora v aystenite and ego vzaemodeistvie s dislokatiyami [On the type of dissolution of boron in austenite and its interaction with dislocations] *Metallozn. Term. Obrob. Met.* – [Metallurgy and heat treatment of metals], 1999, No. 4, pp. 55–57 .
10. Bokshtein S. Z. *Diffuziya and structura metallov* [Diffusion and Structure of Metals], Moscow: *Metallurgiya*, 1973, 206 p (in Russian).
11. Novikov M. M., Spiridonova I. M., and Filonenko N. Yu., Osoblivosti ,boridnix faz y yglighevix splavax sho mistyat bor [Specific features of boride phases in boron-containing carbon steels]. *Visn. Kyiv. Nats. Univ.*, 2007, No. 3, pp. 525–531 (in Ukrainian).
12. Filonenko N. Yu. Investigation of the thermodynamic functions of boron-containing phases in the Fe–B–C system *Fiz. Khim. Tverd. Tila*– [Physical and chemistry of solid state], 2011, 12, No. 2, pp. 370–374 (in Ukrainian).
13. Filonenko N. Yu., Fedorenkova L. I., and Spiridonova I. M. Влияние деформационного воздействия на диффузию бору в среднеуглеродистом сплаве [Effect of the deformation action on the diffusion of boron in a medium-carbon alloy]. *Fiz. Tekh. Vys. Davl.* – [Physical and technical of high pressure], 2010, 20, No. 1, pp. 102–109 (in Ukrainian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.Г. Верещак (Україна д-ром. техн. наук., проф. Л.М. Дейнеко (Україна))