

DOI:

УДК 621.785.5: 621.793.6

B.P. Sereda, Doctor of Technical Sciences, Prof., seredabp@ukr.net

I.V. Paleshova, graduate student, seredabp@ukr.net

A.S. Gaydaenko, graduate student, seredabp@ukr.net

D.B. Sereda, assistant, seredabp@ukr.

Dniprovsky state technical university, Kamianske

MODELING OF THE PROCESS OF TITANIUM COATINGS ON DESIGNING MATERIALS IN POWDERED ENVIRONMENTS

The paper considers the methods of obtaining titanium coatings on structural steels doped with boron and copper. The technology of formation of protective layers under non-stationary temperature conditions is presented. The influence of composition and dispersion of reaction charges on the temperature and kinetic characteristics of the coating formation process is studied. Investigation of the influence of catalysts additives on the thermophysical properties of the charge and the process of diffusion saturation in non-stationary temperature conditions. Comparative analysis of technological parameters of the process, structure, phase, chemical composition and properties of coatings obtained in the charge without the addition of metal-activators and with them, as well as the study of wear resistance of layers under conditions of slip friction. Recommended optimal compositions of saturated charge for strengthening of carbon steels. Recommended optimal compositions of saturated charge for strengthening of carbon steels with wear-resistant coatings. The study of wear resistance of the obtained coatings, on carbon steels was conducted.

Keywords: non-stationary temperature conditions, gas transportation technology, gas transport chemical reactions, diffusion saturation, microhardness, wear resistance.

В роботі розглянуті методи отримання на конструкційних сталях титанових покриттів, легованих бором і міддю. Представлена технологія формування захисних шарів при нестационарних температурних умовах. Досліджено вплив складів і дисперсності реакційних шихт на температурні і кінетичні характеристики процесу формування покриттів. Вивчення впливу добавок-каталізаторів на теплофізичні властивості шихти і протікання процесу дифузійного насичення в нестационарних температурних умовах. Порівняльний аналіз технологічних параметрів процесу, структури, фазового, хімічного складу і властивостей покриттів, отриманих у шихтах без добавок металів-активаторів і з ними, а також дослідження зносостійкості шарів в умовах тертя ковзання. Рекомендовані оптимальні склади насичуючих шихт для зміцнення вуглецевих сталей. Рекомендовані оптимальні склади насичуючих шихт для зміцнення вуглецевих сталей зносостійкими покриттями. Проведено дослідження зносостійкості отриманих покриттів, на вуглецевих сталях.

Ключові слова: нестационарні температурні умови, газотранспортна технологія, газотранспортні хімічні реакції, дифузійне насичення, мікротвердість, зносостійкість.

Formulation of the problem

For surface hardening of products from structural and alloyed steels operating in difficult operating conditions, various methods of surface modification are widely used. Methods of obtaining protective coatings on metal products differ in the technology of coating and the main purpose of their creation is good adhesion to the substrate, as well as to obtain a solid, non-porous and stable protective layer in this medium. According to the type of connection of the protective layer with the substrate, adhesion and diffuse metallic coatings are distinguished. One of the most widely used methods of surface hardening of steels is chemical heat treatment (HTO) [1]. Among such processes, an important place is occupied by the technology of saturation of the surface layer of steel with boron. The purpose of this work was a theoretical and experimental study of the physicochemical processes underlying the production of complex titanium-boride coatings on structural steels under non-stationary temperature

conditions using the principle of gas-transport chemical reactions [15], the search for optimal powder blends, allowing to form multi-component protective layers on steels, studying the influence of the nature of reagents, saturate, the composition of the reaction mixtures, the chemical composition of steels and parameters of the saturation process (time audio, and temperature) in the composition, structure and properties of coatings Titanium boride. The study of the effect of catalyst additives on the thermophysical properties of the charge and the course of the process of diffusion saturation in non-stationary temperature conditions. Comparative analysis of the technological parameters of the process, structure, phase, chemical composition and properties of coatings obtained in the mixtures without additives of activating metals and with them, as well as studies of the wear resistance of layers under conditions of sliding friction.

Analysis of recent research and publications

Borides of the type of borides have high physical and mechanical characteristics. The microhardness of the layers reaches 20000—30000 MPa and these values of microhardness can be maintained up to temperatures of 600—700 °C, which is important for increasing the wear resistance of products operating at high temperatures. When boring on the surface of steel products, sufficiently long layers can be obtained, however, due to the different coefficients of thermal expansion of the layer and base, they are characterized by low adhesion on the substrate and high brittleness of [2]. Most of the known boriruvannya processes are long (4—12:00), labor-intensive, material and energy costs of [3—10], which leads to an increase in the cost of products.

In addition, prolonged high-temperature isothermal exposure can lead to overheating of steel products, which significantly impairs the structure and mechanical properties of parts. Therefore, the intensification of boriruvannya processes, as well as obtaining coatings of the boride type, resistant to spalling and obtaining specified properties in them, is now an urgent task. One solution to this problem may be the application of complex multicomponent coatings in non-stationary temperature conditions. The technology of formation of wear-resistant coatings in non-stationary temperature conditions, is largely devoid of these disadvantages and allows to obtain coatings with a limited or minimal time of their formation. Unsteady temperature conditions — a highly intense exothermic interaction of chemical elements in the condensed phase, capable of spontaneous propagation in the form of a combustion wave [11—14]. The processing efficiency is determined by the time parameters of the process and the thermophysical characteristics of the charge. Therefore, it is of interest to look for a mechanism of action on the course of thermal ignition processes.

Materials and research methods

The object of the study was samples of steel for mass purposes (steel 20, steel 45, U8).

Powders with a dispersity of 60—120 microns were used as reactive agents.

Chemical-thermal treatment was carried out in an open-type reactor ($P = 105 \text{ Pa}$) in the working temperature range of 850—1100 °C. The duration of isothermal exposure ranged from 30 to 60 minutes.

The temperature of the charge was controlled by Chromel-alumel and tungsten-rhenium thermocouples in a protective case placed in the volume of the reaction mixture and connected to a potentiometer of the KSP series. The thickness of the enhanced layers of the coatings was studied on a Neophot-21 light microscope with magnification up to $\times 250$, $\times 500$. The microstructure was detected by etching in a 3 % alcoholic solution of picric acid (TU 6-09-08-317-80). To identify the boundaries of the ferrite grains, a 4 % alcoholic solution of nitric acid was used [16, 19]. For the analysis of the phase composition of the coatings, an x-ray diffractometer DRON-3M was used. The study of the elemental composition of the coatings was performed by the method of micro X-ray spectral analysis using a JEOL "Superprob-733" microanalyzer. Tests for wear resistance were carried out according to GOST 23.208-79 on the installation of SMT-1. To calculate the equilibrium composition of the system products, applied software packages "ASTRA.4", TERRA and Rcalc [17] were used. When developing compositions of powder reactionary mixtures that provide high wear resistance, methods of mathematical planning of the experiment were used with the implementation of a full factorial analysis according to plan 2^3 and fractional factorial experiment 2^{4-1} .

The choice of the optimal composition of the mixture for carrying out the processes under conditions of thermal self-ignition was carried out on the basis of the results of studies of the thermal pattern of the process and the physicochemical properties of protective coatings, in particular wear resistance [10, 18]. The following were selected as independent variables: the content in the charge of the chromium component, titanium, boron and aluminum. Steel 45 was chosen as the starting material.

The calculated levels of variation intervals, the nature of their changes and the coding scheme are presented in Tables 1 and 2. Introduction to the mixture of more than 5 % of the gas transporting agent leads to a strong etching of the sample surface, less than 1 %, does not activate the flow of all gas transporting reactions. To obtain one hundred percent powder composition of the charge as the final product was used Al₂O₃.

Table 1. The factors under study for the titanium-boron system

Characteristic	Factors		
	Quantity B %, <i>m</i>	Quantity XC %, <i>m</i>	Quantity Ti %, <i>m</i>
Code	X_1	X_2	X_3
Basic level	10	20	20
Variation interval	5	5	5
Lower level	5	15	15
Upper level	15	25	25

Table 2. Investigated factors for the system of titanium-boron-copper

Characteristic	Factors			
	Quantity B %, <i>m</i>	Quantity Ti %, <i>m</i>	Quantity Cu %, <i>m</i>	Quantity XC %, <i>m</i>
Code	X_1	X_2	X_3	X_4
Basic level	10	20	8	20
Variation interval	5	5	3	5
Lower level	5	15	5	15
Upper level	15	25	11	25

The result of the experiment should be a mathematical relationship between the characteristics under study in the form of functional communication:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m). \quad (1)$$

As a result of the regression analysis, a number of equations were obtained, showing the dependence of wear resistance of protective coatings on the mode of thermal self-ignition and the content of doping elements.

Numerical values of the regression coefficients and their significance, determined by taking into account the variance differences for each response function, as well as by checking the significance of the Student's criterion and evaluating the adequacy of the model according to Fisher's criterion.

In order to evaluate the adequacy of the equations, we calculated the regression equations obtained for the optimal mode of thermal self-ignition.

The results of the calculations were compared with experimental studies.

From the point of view of thermophysics, the formation of coatings in the mode of thermal self-ignition can be conditionally divided into five consecutive stages: inert heating of the reaction mixture to the ignition temperature, thermal spontaneous combustion, heating products, isothermal exposure, cooling.

The maximum growth rate of coatings is observed at the initial stages of the process. This is due to the fact that austenite, formed at a sharp increase in temperature at the stage of thermal self-ignition, is characterized by a high density of dislocations along the edges of the grains and branched lines of intergranular boundaries [21—22]. In this regard, its diffuse susceptibility increases.

The composition of the charge, the duration and temperature of the isothermal exposure are influenced by the thickness of the formed coatings. The phase composition of the zones depends to a large extent on the diffusive features of the mechanism of the doping elements and the chemical composition of the substrate.

It is established that under the simultaneous treatment method, the main factor affecting the thickness of the coating is the concentration of the doping elements in the reaction mixture.

As the concentration of carbon in the substrate increases, the thickness of the coating decreases.

The phase composition of the zones depends to a large extent on the diffusive features of the mechanism of the doping elements and the chemical composition of the substrate.

In the places of general diffusion of boron and titanium, the diffusion mechanism of coating formation prevails. The diffusing elements form the phases of introduction or substitution with formation of carbide, borides and carboxylic phases doped with titanium, chromium and aluminum by carbonaceous steels. The diffusion of titanium replaces iron with iron and carbon carbohydrates, increasing their resistance.

The obtained titanium-boride coatings are characterized by needle structure, however, when coated with titanium, the needle structure is less pronounced, the needles have a rounded shape, carbide formations acquire a globular shape, thus increasing the plasticity of the coating, thereby reducing the amount of destructive stress.

The coatings formed have a multiphase structure and consist of TiB₂, doped compounds (Fe, Cr, Al) B, (Fe, Cr, Al)₂B, (Fe, Cr, Al) Ti₂ and the transition zone of the solid solution B, Ti, Cr, Al in the iron.

In the investigation of diffuse layers on the PMT-3 device, it was established that the microhardness of boron compounds with titanium on the surface of technical iron and steel is 30000 ÷ 32000 MPa. The microhardness of the alloyed phases of the borides fluctuates within 14000 ÷ 16000 MPa, and the microhardness of the transition zone does not exceed 4500 MPa.

As a result of the tests, the increase in wear resistance of the coatings compared with the diffuse analogue is determined to be 45—50 %, which is due to the presence of the complex of doped phases in the coating and explained by the peculiarities of the process. Compared to the control sample, an increase in wear resistance is observed in 7—8 times.

Conclusions and perspectives of further research

1. The method makes it possible to obtain qualitative coatings based on titanium on carbon steels with reduced material and energy costs.

2. Modeling was carried out to find optimal powder blends for obtaining wear-resistant protective titanium coatings on steels 45 and U8 obtained for non-stationary temperature conditions. The structures of protective layers and their wear resistance under conditions of sliding friction have been studied.

3. Titanium-boron steel has improved wear resistance (7,0—8,0 times) compared to uncoated samples.

List of reference links

- [1] Trefilova N.V. Analiz sovremennyh metodov nanesenija zashhitnyh pokrytij // *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. – 2014. – № 10. – S. 67–67.
- [2] Voroshnin L.G., Ljahovich L.S. *Borirovanie stali*. – Moscow: Metallurgija, 1978 – 239 s.
- [3] Voroshnin L.G. *Borirovanie promyshlennyh stalej i chugunov*. – Minsk, 1981 – 237 s.
- [4] Lahtin Ju. M. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. / Ju. M. Lahtin // – Moscow: Metallurgija, 1993. – 448 s.

- [5] Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L.S.– Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 s.
- [6] Lahtin Ju. M., Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 256 s.
- [7] Filonenko B.A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija. M.: Mashinostroenie. 1981 – 137 s.
- [8] Labunec V. F., Voroshnin L.G., Kindrachuk M.F. Iznosostojkost' boridnyh pokrytij.– Kiev: Izd. «Tehnika», 1989, 204 s.
- [9] Shatinskij V.F., Nesterenko A.I. Zashhitnye diffuzionnye pokrytija.– Kiev: Naukova dumka, 1988 – 272 s.
- [10] Lahtin Ju. M. Poverhnostnoe uprochnenie stalej i splavov / MiTOM, 1988, № 11, s. 11–14.
- [11] Merzhanov A.G. Processy gorenija i sintez materialov.– Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 s.
- [12] Grigor'ev Y.M., Merzhanov A. G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, № 4.– p. 600–639.
- [13] Kogan Ja. D., Sereda B. P., Shtessel' Je. A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991, № 6.– s.39–40.
- [14] Sereda B.P. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija tehnologij nanesenija zashhitnyh pokrytij v uslovijah SVS / B.P. Sereda, I.V. Krugljak, V.I. Ivanov // Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. – 2004. – № 1. – S. 88–93.
- [15] Shefer G. Himicheskie transportnye reakcii.– Moscow: Mir, 1964. – 189 s.
- [16] Bekkert M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniju.– Moscow: Metallurgija, 1979. – 336 s.
- [17] Sinjarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev R.K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov. – Moscow: Nauka, 1982. – 263 s.
- [18] Sereda B.P., Ivanov V.I., Gricaj V.P., Usenko Ju. I. Poluchenie borirovannyh pokrytij v uslovijah samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza / Izv. VUZov. Chernaja Metallurgija, 1998, № 9, s. 57–61.
- [19] Bjalik O.M., Kondratjuk S.E., Kindrachuk M.V., Chernenko V.S. Strukturnij analiz metaliv. Metalografija. Fraktografija: Pidručnik. – Kiev: VPI VPK «Politehnika», 2006. – 328 s.
- [20] Gur'ev A.M., Ivanov S.G. Mehanizm diffuzii bora, hroma i titana pri odnovremennom mnogokomponentnom poverhnostnom ligirovanii zhelezouglerodistyh splavov / Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija, 2011, № 1, s. 56–61.
- [21] Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339 p. – P. 945–948.
- [22] Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550 p. – P. 931–934.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ТИТАНОВИХ ПОКРИТТІВ НА
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ В ПОРОШКОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ
Середа Б.П., Палехова І.В., Гайдасько О.С., Серeda Д.Б.**

Реферат

Метою цієї роботи було теоретичне і експериментальне дослідження фізико-хімічних процесів, що лежать в основі отримання комплексних покриттів титано-боридних на конструкційних сталях при нестационарних температурних умовах із застосуванням принципу газотранспортних хімічних реакцій, пошук оптимальних порошкових шихт, що дозволяють формувати багатокомпонентні захисні шари на сталях, вивчення впливу природи реагентів, що насичують, складу реакційних сумішей, хімічного складу сталей і параметрів процесу насичення (часу, температури) на склад, структуру і властивості покриттів титано-боридних. Вивчення впливу до-

бавок-каталізаторів на теплофізичні властивості шихти і протікання процесу дифузійного насичення в нестационарних температурних умовах. Порівняльний аналіз технологічних параметрів процесу, структури, фазового, хімічного складу і властивостей покриттів, отриманих у шихті без добавок металів-активаторів і з ними, а також дослідження зносостійкості шарів в умовах тертя ковзання.

Вибір оптимального складу суміші для проведення процесів в умовах теплового самозаймання проводили на підставі результатів досліджень теплової картини процесу і фізико-механічних властивостей захисних покриттів, зокрема зносостійкість, ΔG (випробування на машині тертя СМТ-1, $\tau_{\text{досл.}}$ — 5 г.). В якості незалежних змінних були вибрані: вміст у шихті хромистої складової, титану, бору і алюмінію. В якості початкового матеріалу була обрана сталь 45.

Розрахункові рівні інтервалів варіювання, характер їх змін і схеми кодування представлені в таблицях 1 і 2. Введення в суміш більше 5 % газотранспортного агенту призводить до сильного розтравлення поверхні зразка, менше 1 % не активізує протікання усіх газотранспортних реакцій. Для отримання стовідсоткового складу порошкових шихт як кінцевого продукту використовувався Al_2O_3 .

В результаті регресивного аналізу, були отримані ряд рівнянь, що показують залежність зносостійкості захисних покриттів від режиму теплового самозаймання і вмісту легуючих елементів.

Чисельні значення коефіцієнтів регресії і їх значущість, визначені з урахуванням відмінності дисперсій для кожної функції відгуку, а також перевірка значущості за критерієм Стьюдента і оцінка адекватності моделі за критерієм Фішера.

Для оцінки адекватності рівнянь був проведений розрахунок по отриманих рівняннях регресії для оптимального режиму теплового самозаймання.

Результати розрахунків були зіставлені з експериментальними дослідженнями.

З точки зору теплофізики формування покриттів в режимі теплового самозаймання умовно можна розділити на п'ять послідовних стадій: інертне прогрівання реакційної суміші до температури займання, теплове самозаймання, прогрівання виробів, ізотермічна витримка, охолодження. Отримані покриття титано-боридні характеризуються голчастою будовою, проте при спільному насиченні з титаном, голчаста структура менш виражена, голки мають округлішу форму, карбідні утворення набувають глобулярної форми, таким чином підвищуючи пластичність покриття, внаслідок чого знижується величина руйнівної напруги.

Покриття, що утворилися, мають багатофазну будову і складається з TiB_2 , легованих з'єднань $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{B}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_2\text{B}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{Ti}_2$ і перехідної зони твердого розчину B , Ti , Cr , Al в залізі.

При дослідженні дифузійних шарів на приладі ПМТ-3 встановлено, що мікротвердість з'єднань бору з титаном на поверхні технічного заліза і сталей складає 30000–32000 МПа. Мікротвердість легованих фаз бориду коливається в межах 14000–16000 МПа, а мікротвердість перехідної зони не перевищує 4500 МПа.

В результаті випробувань встановлено підвищення зносостійкості покриттів в порівнянні з дифузійним аналогом на 45—50 %, що пов'язано з присутністю в покритті складнолегированих фаз і пояснюється особливостями процесу. В порівнянні з контрольним зразком спостерігається підвищення зносостійкості в 7—8 разів.

Література

1. Трефилова Н.В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий / Н.В. Трефилова // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10. – С. 67–67.
2. Ворошнин Л.Г. Борирование стали / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. – М.: Металлургия, 1978. – 239 с.
3. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов / Л.Г. Ворошнин. – Минск: Издательство Беларусь, 1981. – 237 с.

4. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
5. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник* / под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
6. Лахтин Ю.М. *Химико-термическая обработка металлов: Учебное пособие для ВУЗов* / Ю.М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
7. Филоненко Б.А. *Комплексные диффузионные покрытия* / Б.А. Филоненко. – М.: Машиностроение, 1981. – 137 с.
8. Лабунец В.Ф. *Износостойкость боридных покрытий* / В.Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М.Ф. Киндрачук. – Киев: Изд. «Техніка», 1989. – 204 с.
9. Шатинский В.Ф. *Защитные диффузионные покрытия* / В.Ф. Шатинский, А. И. Нестеренко. – Киев: Наукова думка, 1988. – 272 с.
10. Лахтин Ю.М. *Поверхностное упрочнение сталей и сплавов* / Ю.М. Лахтин // *МиТОМ*. – 1988. - №11. – с. 11–14.
11. Мержанов А.Г. *Процессы горения и синтез материалов* / А.Г. Мержанов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
12. Grigor'ev Y.M. SHS coatings / Y.M. Grigor'ev, A.G. Merzhanov // *Int. J. of SHS*. – 1992. – v.1. – №4. – p. 600–639.
13. Коган Я.Д. *Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС* / Я.Д. Коган, Б.П. Середа, Э.А. Штессель // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1991. – №6. – с. 39–40.
14. Середа Б. П. *Современное состояние и перспективы развития технологий нанесения защитных покрытий в условиях СВС* / Б.П. Середа, И.В. Кругляк, В.И. Иванов // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2004. – №1. – С. 88–93.
15. Шефер Г. *Химические транспортные реакции*. – М.: Мир, 1964. – 189 с.
16. Беккерт М. *Справочник по металлографическому травлению* / М. Беккерт, Х. Клемм. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
17. *Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов* / [Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Р.К. Моисеев]. – М.: Наука, 1982. – 263 с.
18. Середа Б.П. *Получение борированных покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза* / Б.П. Середа, В.И. Иванов, В.П. Грицай, Ю.И. Усенко // *Изв. ВУЗов. Черная Металлургия*. – 1998. – №9. – С. 57–61.
19. *Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник* / [О.М. Бялік, С.Є. Кондратюк, М.В. Кіндрачук, В.С. Черненко]. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. – 328 с.
20. Гурьев А.М. *Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном поверхностном легировании железоуглеродистых сплавов* / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2011. – №1. – С. 56–61.
21. Sereda B., Sereda D. *Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology 2016. Salt Lake City, Utah USA*. – 2016. – 1339p. – P. 945–948.
22. Sereda B., Sereda D. *Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA*. – 2012. – 1550p. – P. 931–934.