

DOI:

UDC 621.785.5: 621.793.6

I.V. Kruglyak, Ph.D., Associate Professor, Doctoral Student, seredabp@ukr.net
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

MODELING OF DIFFUSION COATINGS STRUCTURE WITH VANADIUM AND TUNGSTEN IN COMPOSITION-FILLING ENVIRONMENTS

The process of modeling the production of vanadium and tungsten coatings is an effective method of increasing the reliability and durability of machine parts, tools by creating protective layers on the surface of the workpiece, which have a unique set of physico-chemical properties.

One of the most effective methods of developing protective layers having high mechanical, physical and chemical characteristics is the diffusion saturation of the surface of the layers using composite powder materials.

The formation of protective coatings in composite saturation media occurs under non-stationary temperature conditions. The method of diffusion saturation of the solid phase surface in the active gas medium is based on the analysis of the requirements for the diffusion layer and the method of metal saturation is selected. The rates of chemical processes are determined by kinetic regularities that depend on both temperature and diffusion factors. This method provides high surface quality, is the simplest and most used in laboratory practice, reproduces well in production conditions, and does not require special sophisticated equipment to implement it.

Keywords: composite powder materials; diffusion; modeling; coatings; tungsten; vanadium.

Процес моделювання отримання ванадієвих та вольфрамівих покриттів є ефективним методом підвищення надійності та довговічності деталей машин, інструментів за рахунок створення захисних шарів на поверхні оброблюваних деталей, які мають унікальний набір фізико-хімічних властивостей.

Одним з найбільш ефективних методів розробки захисних шарів, що володіють високими механічними, фізичними та хімічними характеристиками, є дифузійне насичення поверхні шарів із застосуванням композиційних порошкових матеріалів.

Формування захисних покриттів в композиційних насичуючих середовищах відбувається при нестационарних температурних умовах. Метод дифузійного насичення поверхні із твердої фази в активному газовому середовищі проводився на основі аналізу вимог, що пред'являються до дифузійного шару та обрано спосіб насичення металу. Швидкості протікання хімічних процесів визначаються кінетичними закономірностями, залежними як від температури, так і від дифузійних чинників. Цей метод забезпечує високу якість поверхні, він є найпростішим і найбільш використовуваним у лабораторній практиці, добре відтворюється у виробничих умовах, і не потребує спеціального складного обладнання при його реалізації.

Ключові слова: композиційні порошкові матеріали; дифузія; моделювання; покриття; вольфрам; ванадій.

Problem's Formulation

Carbon steels are characterized by a sufficiently low wear resistance, but as a result of chemical-thermal treatment, the chemical composition and structure of the surface layer is changed, which significantly affects the performance characteristics of the hardened steel. The surface layer acquires new properties, sometimes losing some of the properties of the base steel.

Studies of the surface saturation of steels and alloys have shown that the simultaneous doping of the surface layer with several elements, both from a technological point of view and to enhance their properties. However, the selection of components and modes of diffusion saturation is, unfortunately, carried out experimentally, based on the results of other researchers and their own intuition.

The formation of protective coatings in composite saturation media occurs under non-stationary temperature conditions. The changing temperature over time, first due to external warming, and then due to ignition, leads to the fact that neither thermal nor chemical equilibrium until complete

completion of the process and the cooling of the products is impossible. The rates of chemical processes are determined by kinetic regularities that depend on both temperature and diffusion factors. However, assuming, at least at the stage of warming, that the inhibition of the gas phase diffusion processes is small and the rate of change of temperature is small, we consider that the equilibrium composition of the products corresponds to each temperature value in comparison with the rate of gas-phase chemical reactions.

Then, by calculating the equilibrium composition of the reaction products for a number of specific temperatures from the range of its change, one can observe the chemical picture of the process development.

Analysis of recent research and publications

In the article Kukhareva N.G., Galynska N.A., Petrovich S.N. [1] when considering the process of formation of diffusion layers usually make an attempt to trace this process using diagrams of the state of the alloys. At the same time, they proceed from the position that has become almost the rule that the formation of a layer on the isotherm of diffusion follows the increase of the concentration of the diffusing element in the alloy system and obeys the laws of phase transformations. In this case, first the phases of the lower composition, then the middle and finally the higher (pure or atomic diffusion theory) should arise [2]. According to another theory (reaction diffusion theory), the formation of a diffusion layer can begin with the formation of a phase of the highest or medium composition, having passed the stage of formation of the phase of the lower composition, if the thermodynamic conditions for the formation of these phases are more favorable than for the phases of the lower composition [3]. The paper deals with vanadium chromium, tungsten chromium protective diffusion layers obtained under non-stationary temperature conditions. According to the Fe – V – Cr and Fe – W – Cr diagrams. A variant of the system state diagram was proposed in [4]. Based on the analysis of the general nature of the interaction of chemical elements with iron, it was assumed that continuous solubility — α -solid solution should be observed at high temperatures in the system. When cooled in binary systems, isomorphous FeCr and FeV phases appear, forming a solid solution a separated from a by the two-phase domain $\alpha + \sigma$. This structure of the system is confirmed by further studies. An isothermal section at 700 °C was studied by X-ray diffraction analysis. The same method investigates a polythermal section that passes through the FeV and FeCr junction, an isothermal section at room temperature, and an area of α -phase propagation into the ternary system at different temperatures. Based on thermodynamic data on dual systems, isothermal sections at 427, 700, and 900 °C were constructed by calculation, ie at temperatures below and above the stability interval and α -phase (Fig. 1).

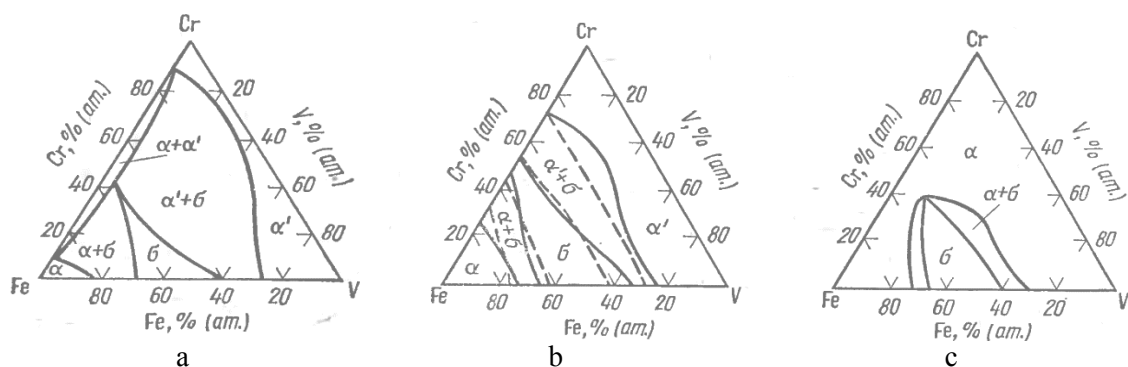


Fig. 1. Isothermal sections of a part of the Fe – V – Cr system at 427 °C (a), 700 °C (b), and 900 °C (c) [4]

Researchers [4] alloys of a system rich in chromium [40% (by weight) W and 55% (by weight) Cr] by microstructural, X-ray and thermal methods, and also measured microhardness and hardness.

The isothermal sections of the system over the entire concentration range at 2000, 1725, 1550, and 1375 K. were calculated by calculation using data on the binary systems forming this triple. In Fig. 2 shows isothermal sections at 2000 and 1375 K.

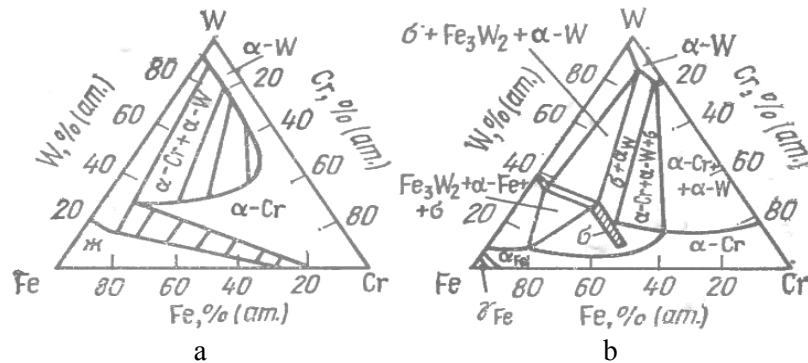


Fig. 2. Isothermal sections of the Fe–W–Cr system at 2000 and 1375 K [4]

The extensive theoretical and experimental material [5—12], which is based on the application of precision methods for the study of the phase and chemical compositions of the diffusion layer, convinces us that in many cases the practice of chemical-thermal treatment of the formation of the diffusion layer does not obey the equilibrium condition, intermittent and may begin with the formation of the phase of higher or middle composition. In this case, the structure of the diffusion layer is not equilibrium. Among the various factors affecting the mechanism of formation of the diffusion layer with non-equilibrium structure, the main ones are the initial conditions preceding the process of diffusion of elements into metal, which directly or indirectly depend on a number of physicochemical and kinetic saturation factors, especially significant when it comes to a multicomponent system the saturation presented in this study.

With the emergence of the theory of nonequilibrium systems, it became possible to influence the structure and properties of diffusion layers by changing the dynamics of the saturation process itself. By changing the composition of the saturating medium and the ratio of its components, it is possible to influence the system and thereby change the kinetics of the diffusion processes.

Formulation of research purpose

The purpose of this work is the physicochemical modeling of the formation of coatings obtained using composite saturating media presenting main material

In diffusion saturation, it is important to transfer the components to the surface through the saturating gas phase. Obtaining protective coatings is carried out under non-stationary temperature conditions, so it is important that chemical transport reactions, the implementation of which due to the gas transport agent (GTA) in powder mixtures, is associated with the presence of temperature gradients.

According to the work of Yu.M. Lahtin [13] embryos of the α -phase grow in the diffusion direction, forming characteristic column crystals, and as required for their growth, the saturation is reached at the point of contact of α and γ -phases. Sometimes the diffusion layer has a crystallographic texture. This phenomenon can be observed in boring and alitating, when intermetallic phases are formed, which allow the predominant diffusion in a certain structurally determined direction.

For diffusion at a temperature t_3 (below A_3) of the element expanding the γ -region, first the diffusion proceeds in the α -phase, and then the γ -phase is formed. To determine D in the case of reactive diffusion, the Matano method should be used. An effective diffusion coefficient can also be determined without having a concentration curve, assuming that the concentration of the diffusing element within the α and γ phases varies linearly. In this case, for the α phase.

$$D_\alpha = \frac{1}{2\tau} \frac{x_\alpha}{c_s - c_{\alpha\gamma}} \int_0^{(c_s + c_{\alpha\gamma})/2} x dC, \quad (1)$$

where x_α — is the width of the area occupied by the α -phase.

Since phase growth obeys parabolic dependence, the α -phase growth rate will be equal to $x_\alpha/2\tau$. From (1) it can be seen that the greater the D in this phase, the narrower the adjacent two-phase region, and the wider the phase homogeneity region, the greater the phase growth rate.

Wagner gave a method for calculating D for reactive diffusion over an experimentally determined thickness of diffusion layers for two cases. In the first case, the two-phase sample is the initial one ($\alpha + \gamma$) with concentration C_0 and constant concentration on the surface C_s ($C_s > C_{\alpha,\gamma}$). The position of the boundary of the growing phase is subject to parabolic dependence

$$x = 2b\sqrt{D_\alpha\tau},$$

in which x and τ are experienced, and b is determined by the formula

$$\frac{C_s - C_{\alpha,\gamma}}{C_{\alpha,\gamma} - C_0} = \sqrt{\pi} b e^{b^2} \operatorname{erf}(b) = F(b).$$

The functions $F(b)$ can be found in a special table. Having determined $\frac{C_s - C_{\alpha,\gamma}}{C_{\alpha,\gamma} - C_0}$, find $F(b)$, and b and D_α . By known value D_α it is possible to calculate the growth rate of α -phase.

In the second case, the initial one (C_0) serves as a single-phase sample (γ). Diffusion is realized in two phases γ and α and is determined by two diffusion coefficients D_α and D_γ .

As in the previous case, the growth of the diffusion layer proceeds by parabolic law:

$$x = 2b\sqrt{D_\alpha\tau}, \quad (2)$$

where D_α — α -phase diffusion coefficient; τ — is the saturation time.

$$C_{\alpha,\gamma} - C_{\gamma,\alpha} = \frac{C_s - C_{\alpha,\gamma}}{\sqrt{\pi} b e^{b^2} \operatorname{erf}(b)} - \frac{C_{\alpha,\gamma} - C_0}{\sqrt{\pi} b \sqrt{\varphi} e^{b^2 \varphi} \operatorname{erf}(b\sqrt{\varphi})}, \quad (3)$$

where $\operatorname{erf}(b) = 1 - \operatorname{erf}(b)$, $a\varphi = \frac{D_\alpha}{D_\gamma}$.

Knowing one of the diffusion coefficients, one can determine the other; knowing D_α and D_γ , it is possible to calculate the α -phase growth rate.

To determine D_α , a formula is proposed

$$D_\alpha = \frac{x^2}{4\tau \ln\left(\frac{M_0}{M_1 - C_{\alpha,\gamma}}\right)}, \quad (4)$$

where M_0 is the mass of the diffusing substance defined by the total area bounded by the concentration curve and the coordinate axes, and M_1 is the mass of the diffusing substance determined by the part of the curve corresponding to the gamma phase.

The optimal composition of the charge for carrying out processes under non-stationary temperature conditions was chosen based on the results of studies of the thermal picture of this process and the physicochemical properties of protective coatings, in this case, heat resistance $\Delta G_2 - t = 700$ °C, $\tau = 20$ h.

When using a silicon component as a supplier of silicon, the following tests of physical and mechanical properties were carried out: heat resistance, $\Delta G - t = 800$ °C, $\tau = 20$ h.

Equations (5, 6) describing the effect of silicon, boron, titanium, and tungsten on the heat resistance of protective coatings have the following form:

$$\Delta G_1 = 324,5 - 6,5XC - 2,4W - 2,7Si; \quad (5)$$

$$\Delta G_2 = 251,4 - 2,825XC - 1,625KpC - 1,725W. \quad (6)$$

To assess the adequacy of the obtained equations, a calculation was performed using the obtained regression equations. The calculation results were compared with experimental studies. According to the results of the work, the error between the calculated and experimental values of the response function does not exceed 5%, which indicates the correctness of the calculated model (Fig. 3).

To obtain composite saturating powder charge, a complete factor experiment 2^3 was conducted, in which the main factors were: energy component, titanium, as well as tungsten and vanadium.

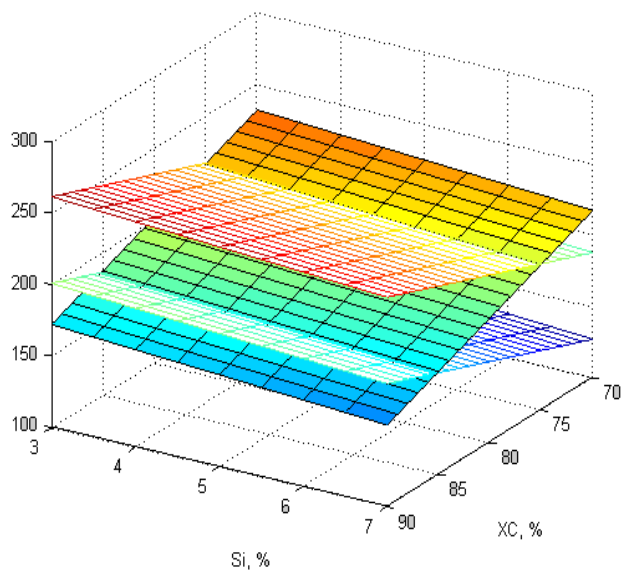


Fig 3. Optimization of the composition of multicomponent siliconized coatings for the combustion regime, the effect Si, W, Al on the heat resistance ΔG_1 ($10^{-4} \cdot \text{g}/\text{m}^2$) at $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20 \text{ h}$

Obtaining diffusion layers was carried out in the mode of thermal auto-ignition, which will be realized if the characteristic time of external heating is more than the characteristic time of the reactor as a whole. In the first stage — the stage of inert warming the main thermal reaction does not proceed. The charge for the time from 0 to τ_1 warms up to the auto-ignition temperature (t^*). 0 to τ_1 warms up to the auto-ignition temperature (t^*). The diffusion coating is not yet formed. In stage II — the stage of thermal self-ignition, the main exothermic reaction occurs and the temperature rises from t^* to t_{\max} at a rate of 100—300 deg/s. Over time ($\tau_1 - \tau_2$), halides of aluminum, titanium, vanadium, and tungsten begin to form. In stage III — the temperature drops to the saturation temperature due to the heat extraction by the parts. During the time ($\tau_2 - \tau_3$), the α — phase begins to form. In stage IV, the isothermal holding step ($\tau_3 - \tau_4$), a protective coating is formed. The duration of this stage determines the different thickness of the diffusion coatings. Unlike stationary modes, the thickness of the coating is much higher due to the fact that austenite formed by rapid heating under non-stationary temperature conditions, is characterized by increased dislocation density, fine-grained and fine-grained. As a result, the process of diffusion saturation proceeds more intensively, as is observed with high-speed electric heating. In the V stage — (cooling stage — τ_5) the coating is formed more slowly due to the temperature drop. As the cooling rate increases, the total diffusion coating formation time decreases [14—17].

Conclusions and prospects for further research

As a result of physicochemical modeling it is established that the process of obtaining diffusion layers is possible only under the condition of solubility of the diffusing element in the metal and a sufficiently high temperature that provides the necessary energy to the atoms. The possibility of chemical transport in the combustion wave is based on the fact that in the process of combustion there is a consistent change of temperature modes and the temperature at each point of the mixture runs a series of continuous values from T_0 to T_g . Thus, a non-stationary temperature process combined with chemical transport reactions can be used to obtain diffusion layers.

References

- [1] Kukhareva, N.G., Galynskaya, N.A., Petrovich, S.N. (2013). *Investigation of the physicomachanical properties of boride coatings on carbon steels* [Science – education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference]. Minsk: BNTU [in Belarus]

- [2] Lakhtin, Yu.M. (1948). [Physical foundations of the nitriding process]. Moskov: Mashgiz [in Russia]
- [3] Bugakov, V.Z. (1949). [Diffusion in metals]. L, M: GITTL. [in Russia]
- [4] Bannykh, O.A., Budberg, P.B., Alisova, S.P. et. (1986). [State diagrams of binary and multicomponent systems based on iron]. M.: GITTL. [in Russia]
- [5] Kukhareva, N.G., Petrovich, S.N., Galynskaya, N.A., Protasevich, V.F., Smirnova, T.N. (2012). *Boroning of carbon and alloy steels in a fluidized bed* [Science and technology: international scientific and technical], 5, 8–12. [in Belarus]
- [6] Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Galynskaya N.A. (2009). *The influence of thermal diffusion carbonitration conditions and the structure of diffusion coatings on the mechanical properties of tool steel P6M5* [Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal], 4, 25–29. [in Belarus]
- [7] Galynskaya, N.A., Kukhareva, N.G., Petrovich, S.N., Babul, T., & Obukhovich Z. (2012). *Study of the wear resistance of boride coatings obtained from composite powder media* [Science and technology: international scientific and technical journal], 1, 10–16. [in Belarus]
- [8] Galynskaya, N.A. (2004). Features of the technology for complex diffusion coatings based on boron and chromium. Prospects for the development of surface and volume hardening of alloys: *a collection of scientific papers dedicated to the 40th anniversary of the Department of "Materials Science in Mechanical Engineering"* ed. Voroshnina L.G; BNTU. Minsk, 48–52. [in Ukraine]
- [9] Galynskaya, N.A., Kukhareva, N.G., Niss V.S., Petrovich, S.N. (2011). *Features of the formation of boride coatings from composite metallothermal powder media* [Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal], 4, 15–20. [in Belarus]
- [10] Galynskaya, N.A., Stasevich, G.V. (2013). Comparative analysis of the characteristics of diffusion layers obtained in a "fluidized bed" and with traditional furnace heating. *Science–education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference*. (Vols. 1), (p. 372). Minsk: BNTU. [in Belarus]
- [11] Galynskaya, N.A., Kukhareva, N.G., Petrovich, S.N., Stasevich, G.V. (2010). Hardening processing of dies for deep drawing. [Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal], 4, 30–34. [in Belarus]
- [12] Kruglyak, I.V. (2019). Modeling of diffusion layers by mathematical modeling. [Mathematical modeling, 2. (41), 124–129. [in Ukraine]
- [13] Lakhtin, Yu.M., Rakhstadt, A.G. (Ed.). (1980). *Heat Treatment in Mechanical Engineering*. M.: Mechanical Engineering.
- [14] Sereda, B.P., Bannikov, L.P., Nesterenko, S.V., Kruglyak, I.V., Gaydaenko, O.S., & Sereda D.B. (2019). *Superficial strengthening of materials of working in the conditions of complex influence aggressive substances*. [Surface hardening of materials working under the conditions of complex influence of aggressive substances]. Kamianske: DDTU. [in Ukraine]
- [15] Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Mikhailin, V.M., Kruglyak, D.O. (2014). Improving the wear and corrosion resistance of equipment parts of metallurgical enterprises.–*Metallurgy: Zbirnik naukovykh praz: – Vip. 2 (30) – Zaporizhzhia, ZDIA*, p. 146–153. [in Ukraine]
- [16] Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Belokon, Yu.A., Sereda, D.B. (2015). Preparation of chromoalitized coatings on carbon materials in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Construction, materials science, mechanical engineering: Collection of scientific. labor. Vol. 48. Part 1 / Under the general. ed. prof. IN AND. Bolshakova. – Dnipropetrovsk: Dnieper state. Academic construction and arch*, 296–300. [in Ukraine]
- [17] Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Baskevich, O.S., Belokon, Yu.O., Kruglyak, D.O., & Sereda, D.B. (2019). *The superficial strengthening of construction materials is with the use of composition saturant environments* [Surface hardening of structural materials using composite saturating media]. Kamianske: DDTU. [in Ukraine]

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ДИФУЗІЙНОГО ПОКРИТТЯ З ВАНАДІЄМ ТА ВОЛЬФРАМОМ В КОМПОЗИЦІЙНИХ НАСИЧУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Кругляк І.В.

Реферат

Утворення захисних покриттів в композиційних насичуючих середовищах відбувається в умовах нестационарних температур. Зміна температури спочатку через зовнішнє нагрівання, а потім через запалювання призводить до того, що ні теплова, ні хімічна рівновага до повного завершення процесу та охолодження продуктів неможливі. Швидкість хімічних процесів визначається кінетичними закономірностями, які залежать як від температури, так і від факторів дифузії.

У статті розглядаються захисні дифузійні шари хрому ванадію, вольфраму хрому, отримані при нестационарних температурних умовах. На основі аналізу загального характеру взаємодії хімічних елементів із залізом передбачалося, що при високій температурі в системі слід спостерігати постійну розчинність. При охолодженні у бінарних системах з'являються ізоморфні фази, утворюючи твердий розчин, відокремлений від двофазної області.

Значний теоретичний та експериментальний матеріал переконує, що у багатьох випадках практика хіміко-термічної обробки утворення дифузійного шару не підпорядковується умові рівноваги, переривчасте і може починатися з утворення фази вищого або середнього складу. При цьому структура дифузійного шару не є рівноважною. Серед різних факторів, що впливають на механізм утворення дифузійного шару з нерівноважною структурою, основними є початкові умови, що передують процесу дифузії елементів у метал, які прямо чи опосередковано залежать від ряду фізико-хімічних та кінетичних факторів насичення, особливо важливо, коли мова йде про багатокомпонентну систему насичення.

При дифузійному насиченні важливо перенести компоненти на поверхню через фазу насичення газу. Отримання захисних покриттів проводиться в умовах нестационарних температурних умов, тому важливо, щоб хімічні реакції транспорту, реалізація яких завдяки газотранспортному агенту в порошкових сумішах, були пов'язані з наявністю температурних градієнтів.

В результаті фізико-хімічного моделювання встановлено, що процес отримання дифузійних шарів можливий лише за умови розчинності дифундуючого елемента в металі та досить високої температури, яка забезпечує необхідну енергію атомам. Можливість транспортування хімічної речовини в хвилі згоряння базується на тому, що в процесі горіння відбувається послідовна зміна температурних режимів і температура в кожній точці суміші працює ряд безперервних значень від T_0 до T_g . Таким чином, для отримання дифузійних шарів може бути використаний нестационарний температурний процес у поєднанні з хімічними реакціями транспорту.

Література

1. Кухарева Н.Г., Галынская Н.А., Петрович С.Н. Исследование физико-механических свойств боридных покрытий на углеродистых сталях. Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. Минск: БНТУ. 2013. С. 371
2. Лахтин Ю. М. Физические основы процесса азотирования: навч. посіб. М.: Машгиз, 1948. 144с.
3. Бугаков В. З. Диффузия в металлах: монография. Л.; М.: ГИТТЛ, 1949. 212с.
4. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справ. изд. М.: Металлургия. 1986. 440 с.
5. Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Галынская Н.А., Протасевич В.Ф., Смирнова Т.Н. Борирование углеродистых и легированных сталей в кипящем слое. Наука и техника: международный научно-технический. 2012. № 5. С. 8–12.
6. Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Галынская Н.А. Влияние условий термодиффузионной карбонитрации и структуры диффузионных покрытий на механические свойства инструментальной стали Р6М5. Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2009. № 4. С. 25–29.

7. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Бабуль Т., Обухович З. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред. Наука и техника: *международный научно-технический журнал*. 2012. № 1. С. 10–16.
8. Галынская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома. Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: *сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры "Материаловедение в машиностроении"* / под ред. Ворошнина Л.Г.; БНТУ. Минск, 2004. С. 48–52.
9. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Нисс Н.Г., Петрович С.Н. Особенности формирования боридных покрытий из композиционных металлотермических порошковых сред. Вестник Белорусского национального технического университета: *научно-технический журнал*. 2011. № 4. С. 15–20.
10. Галынская Н.А., Стасевич Г.В. Сравнительный анализ характеристик диффузионных слоев, полученных в «кипящем» слое и при традиционном печном нагреве. Наука – образованию, производству, экономике: *материалы 11-й Международной научно-технической конференции*. Т. 1. Минск: БНТУ, 2013. С. 372.
11. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Стасевич Г.В. Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки. Вестник Белорусского национального технического университета: *научно-технический журнал*. 2010. №4. С. 30–34.
12. Kruglyak I.V. Modeling of diffusion layers by mathematical modeling. Математичне моделювання *Науковий журнал*. Кам'янське. ДДТУ, 2019. № 2.(41) С. 124–129
13. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. М.: Машиностроение, 1980. 783 с.
14. Серета Б. П., Банніков Л. П., Нестеренко С. В., Кругляк І. В., Гайдаєнко О. С., Серета Д. Б. Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 173с.
15. Серета Б.П., Кругляк І.В., Михайлин В.М., Кругляк Д.О. Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей оборудования металлургических предприятий. Металургія: *Збірник наукових праць*: Вип. 2(30). Запоріжжя, ЗДІА. 2014. 196 с., С. 146–153.
16. Серета Б.П., Кругляк І.В., Белоконь Ю.А., Серета Д.Б. Получение хромоалитированных покрытий на углеродистых материалах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Строительство, материаловедение, машиностроение: *Сборник науч. трудов*. Вып. 48. Ч.1 / Под общ. ред. проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: Приднепровская гос. академ. стр-ва и архит. 2015. С. 296–300.
17. Серета Б. П., Кругляк І. В., Белоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Серета Д. Б. Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів з використанням композиційних насичуючих середовищ: монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 246 с.