

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 519.21

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.25

INCREASING THE THERMAL ENDURANCE OF INJECTION MOLDING PARTS

Глушкова Д. Б.¹, Волчук В. М.²¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Annotation. The use of plasma coatings based on wear-resistant materials opens up wide opportunities for improving the operational properties of parts. Currently, there are many technologies for applying such coatings, among which special attention is paid to chemical vapor deposition and the method of condensation of the material under ion bombardment conditions. For the manufacture of molds intended for pressure casting of copper alloys, 4Kh5MFS and 5KhNM steels were selected in this work. The maximum adhesion activity to the substrate and the effect on increasing the thermal endurance of 4Kh5MFS and 5KhNM steels are achieved at a coating thickness of 2–5 μm , the application time varied from 12 to 30 minutes. The coating was applied to the surface of the steel heated to 500 °C during ion bombardment. As a result of the analysis, the deposition of the $\alpha\text{-Ti}$ phase was recorded. At the same time, micro-X-ray spectral analysis did not reveal deep penetration of titanium into the substrate. After ion bombardment, the hardness of the surface layer increases from 480–500 MPa to 1050 MPa. The fractal dimension of the surface of the 4 μm -thick titanium nitride coating applied to 4Kh5MFS steel increased from 1.856 to 1.914 compared to the surface after heat treatment, and for 5KhNM steel after ion bombardment with titanium this parameter increased from 1.829 to 1.897. This result indicates the relationship between the fractal structure and the physical and mechanical characteristics of the coating.

Key words: plasma, fractal, structure, hardness, thermal endurance, mathematical model.

Introduction

To form a given structure and required properties of the material, various methods of its processing are used [1–3]. One of the most advanced technologies for obtaining castings is injection molding, which ensures high accuracy of finished products, minimizes the need for further machining, and significantly increases the productivity of production processes.

However, despite its significant advantages, the widespread adoption of this technology is limited by the insufficient durability of the molds and their high cost. Today, approximately 30 % of the cost of castings from copper-containing alloys produced by injection molding is accounted for by compensation for wear of technological equipment [4].

Analysis of publications

However, despite its significant advantages, the widespread adoption of this technology is limited by the insufficient durability of the molds and their high cost. Today, approximately 30 % of the cost of castings from copper-containing alloys produced by injection molding is accounted for by compensation for wear of technological equipment [4].

As is known, the main cause of failure of molds (in particular, matrices and liners that perform shape-forming functions) during the casting of copper alloys is thermal fatigue [5]. During operation, the working surfaces of the molds are subjected to cyclic heating and cooling, which causes significant volumetric changes in the material. This, in turn, causes the appearance and accumulation of internal stresses, especially during sharp temperature drops. The maximum values of stresses are reached in the surface layer with a thickness of 100–200 Å [6].

The use of plasma coatings based on wear-resistant materials opens up significant prospects for improving the performance characteristics of products. Currently, there is a wide range of methods for applying such coatings, among which chemical vapor deposition and condensation of matter under ion bombardment conditions occupy a special place [7–9].

Among the above methods, the most effective is the condensation of the substance under conditions of ion bombardment, since it provides the possibility of precise control of the process temperature (~300–800°C). This allows the technology to be used for both high-speed steel parts and products made of hard alloy materials,

which significantly expands the scope of its use. Due to its versatility and high efficiency, the condensation of the substance under conditions of ion bombardment is one of the leading modern surface hardening technologies.

Purpose and statement of the task

The goal is to establish the regularities of the effect of plasma coatings on the thermal endurance of the material.

To achieve the goal, it is necessary to:

1 investigate the coating on the surface of steel heated to 500 °C during ion bombardment;

2 it will determine the maximum activity of adhesion to the substrate and the effect on increasing the thermal resistance of 4Kh5MFS and 5KHNM steels;

3 conduct an X-ray analysis of the coating in the matrix material;

4 apply the theory of fractals to analyze the surface of the titanium nitride coating and investigate the influence of the fractal dimension of the surface on the hardness.

Material and research methods

Since the surface layers of mold parts are subjected to cyclic temperature loads, the level of which is reduced (to $t \sim 650$ °C) due to the protective properties of the plasma coating, they operate under conditions similar to the process of die casting of alloys with a low melting point (aluminum, zinc). The mold material was selected from semi-heat-resistant steels used for die casting of the above alloys. The selection was made taking into account the limited molybdenum content and the absence of tungsten due to its scarcity. In addition, the steels must meet the requirements for the substrate material for titanium nitride coating.

For the manufacture of molds intended for pressure casting of copper alloys, 4Kh5MFS and 5KhNM steels were selected in this work (Table 1).

Table 1 – Chemical composition of steels used for the manufacture of injection molding molds

Steel	Element content, %				
	WITH	Zr	Mo	V	Ni
5XNM	0.50–0.60	0.60–0.80	0.15–0.30	–	1.40–1.80
4X5MFS	0.37–0.44	4.50–5.50	0.80–1.10	0.80–1.20	–

Coatings were applied to laboratory samples and injection mold parts using ion bombardment condensation. This method provides coatings

with high stability, minimal porosity, and excellent adhesion to the substrate.

The coating process was carried out on the Bulat-10 installation (Fig. 1). The method of condensation of a substance under ion bombardment conditions includes two key stages:

1 cleaning, heating, and activating the substrate surface by bombarding it with ions of the material being deposited, accelerated to the required energy level.

Coating deposition with simultaneous ion bombardment of condensate, which contributes to the formation of a coating with optimal performance characteristics [10].

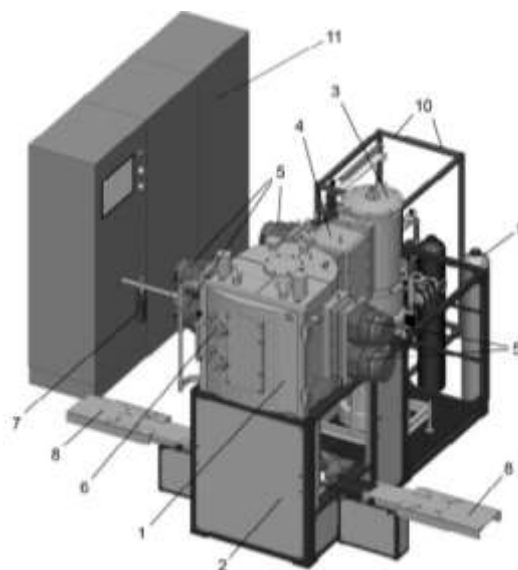


Fig. 1. Key units of the Bulat 10:1 installation – camera; 2 – stand; 3 – vacuum pumping system; 4 – L-shaped filter; 5 – vacuum-arc plasma generators; 6 – viewing window; 7 – manual control panel of the loading-unloading system; 8 – horizontal feed table; 9 – cylinders with working gases; 10 – water supply system; 11 – power supply and control cabinet

The coating time is one of the important technological parameters that needs to be optimized. The deposition rate of titanium nitride (TiN) on the "Bulat-10" installation is 10 μm/h.

Given that the maximum adhesion activity to the substrate and the effect on increasing the thermal endurance of 4Kh5MFS and 5KhNM steels are achieved at a coating thickness within 2–5 μm, the application time varied from 12 to 30 minutes.

The hardening process of selected steel grades was carried out at temperature regimes that ensure the dissolution of most of the carbides and the formation of highly alloyed martensite (Table 2).

Such heat treatment allows to preserve the fine-grained structure of the material while maintaining its sufficient toughness. After hardening, the steels were subjected to high-temperature tempering, which contributes to an increase in impact toughness and endurance limit. This process also provides additional strengthening due to dispersion hardening [11], accompanied by the formation of finely dispersed carbides and achieving a hardness in the range of 42–45 HRC.

When selecting the optimal coating parameters, the pressure of the reaction gas in the installation chamber, the temperature of the substrate preheating, and the duration of deposition were taken into account.

According to the developed thermal endurance testing methodology, the main criterion for assessing the optimal coating application conditions is the number of thermal cycles that the coated sample can withstand before failure.

Table 3 shows the parameters Influence of ion bombardment temperature on the adhesion of the coating to the substrate.

As is known, one of the key parameters of the coating deposition process by the condensation method of matter under ion bombardment conditions is the pressure of the reaction gas [12]. The optimal value of this parameter in a vacuum

chamber is determined individually for each specific case and depends on the composition of the cathode, the characteristics of the equipment, and the operating conditions of the coated parts [9, 13, 14].

Experimental results and their discussion

The steel surface after ion bombardment was studied, as well as the microstructure and phase composition of the coating formed under optimal technological parameters. The coating was applied to the steel surface heated to 500 °C during ion bombardment. As a result of the analysis, the precipitation of the α -Ti phase was recorded (Fig. 2). At the same time, micro-X-ray spectral analysis did not reveal deep penetration of titanium into the substrate.

After ion bombardment, the hardness of the surface layer increases from 480–500 MPa to 1050 MPa. The next stage of processing is the deposition of the coating.

Comparison of the microstructure of the steel surface after applying a titanium nitride coating with a thickness of 4 μm (Fig. 3a) and the surface after heat treatment and grinding before placing the part in the chamber of the Bulat-10 installation (Fig. 3b) showed that the applied coating smoothes micro-roughnesses that can serve as stress concentrators.

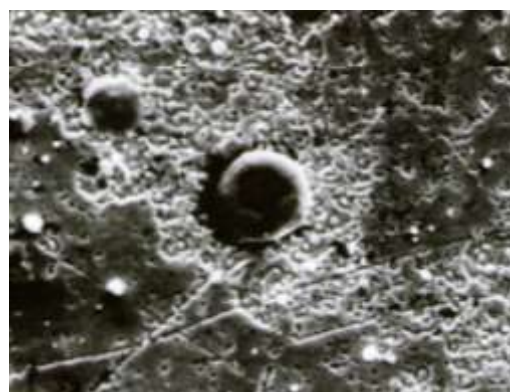
Table 2 – Heat treatment modes of steels 5KhNM, 4Kh5MFS

Steel grades	Hardening					Vacation		
	loading temperature	heating temperature, °C	heating holding time	cooling medium	hardness, HRC _e	temperature, °C	exposure time, hour, including heating the batch of parts	hardness HRC _e
5XNM	700–750	830–860	1-2 min per 1 mm of flow	oil cooling	47–50	500–520	4–5	42–45
4X5MFS		1050–1070			55–61	560–580		42–45

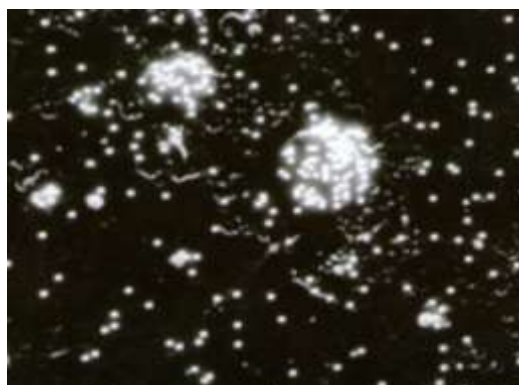
Table 3 – The effect of ion bombardment temperature on the adhesion of the coating to the substrate K_α and the durability of parts during operation

Steel grade	K _α (in the numerator) and cycle stability (in the denominator) at temperature °C					
	without coating	200	300	400	500	700
4X5MFS	–	0,50	0,65	0,75	1	0,50
	2000	2500	3500	7500	12000	5000
5XNM	–	0,50	0,60	0,70	1	0,50
	2000	2100	3400	7000	1100	4500

Note: The titanium nitride coating was applied at a nitrogen pressure of 1 Pa. The coating thickness is 5 μm .



a



b

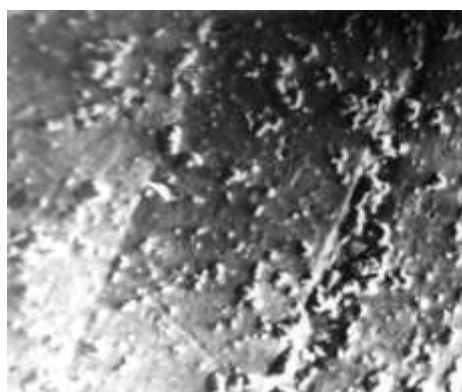
Fig. 2. Surface of 5KhNM steel after bombardment with titanium ions ($\times 1000$): *a* – steel surface after bombardment with titanium ions; *b* – microdistribution of titanium on the surface after ion

At the same time, some geometric defects of the original surface are partially repeated in the coating structure, which indicates the self-similarity of the structure, i.e. its relation to fractals [15]. The fractal (fractional) dimension D of the working surface was calculated by the cellular method (see, for example [16]) after coating with titanium nitride with a thickness of $4\text{ }\mu\text{m}$ (Fig. 3b).

It is determined on the basis of the logarithmic dependence $\ln N(\delta)$, where N is the number of cells with a size δ , i covering the studied structure:

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta} \quad (1)$$

The fractal dimension of the surface of a $4\text{ }\mu\text{m}$ -thick titanium nitride coating for 4Kh5MFS steel increased compared to the surface after heat treatment from 1.856 to 1.914. Also, the fractal dimension of the surface of 5KhNM steel after bombardment with titanium ions increased from 1.829 to 1.897 (Fig. 2).



a



b

Fig. 3. *a* – surface of a $4\text{ }\mu\text{m}$ thick titanium nitride coating applied to 4Kh5MFS steel ($\times 500$); *b* – surface of 4Kh5MFS steel after heat treatment and grinding ($\times 500$)

In addition, the fractal dimension contains valuable information about the properties of the material, which makes the fractal approach to modeling the properties and structure of coatings promising [17].

The results obtained allow us to formulate requirements for surface preparation before applying a plasma coating, which is important for ensuring its adhesion, uniformity, and operational efficiency.

Since the applied coating almost exactly repeats the microrelief of the substrate, the surface before its deposition must have a high degree of smoothness, be mechanically and chemically cleaned, and be free of foreign inclusions, oxide or contaminated areas, as well as defects such as cracks or pores. The study of the microstructure of the applied coating and the surface layer of the sample under the coating (Fig. 4 a) was carried out in the characteristic rays

$Ti_{K\alpha}$ (Fig. 4 a); $N_{K\alpha}$ (Fig. 4 b); $C_{K\alpha}$ (Fig. 4 c); $OK_{K\alpha}$ (Fig. 4 d).

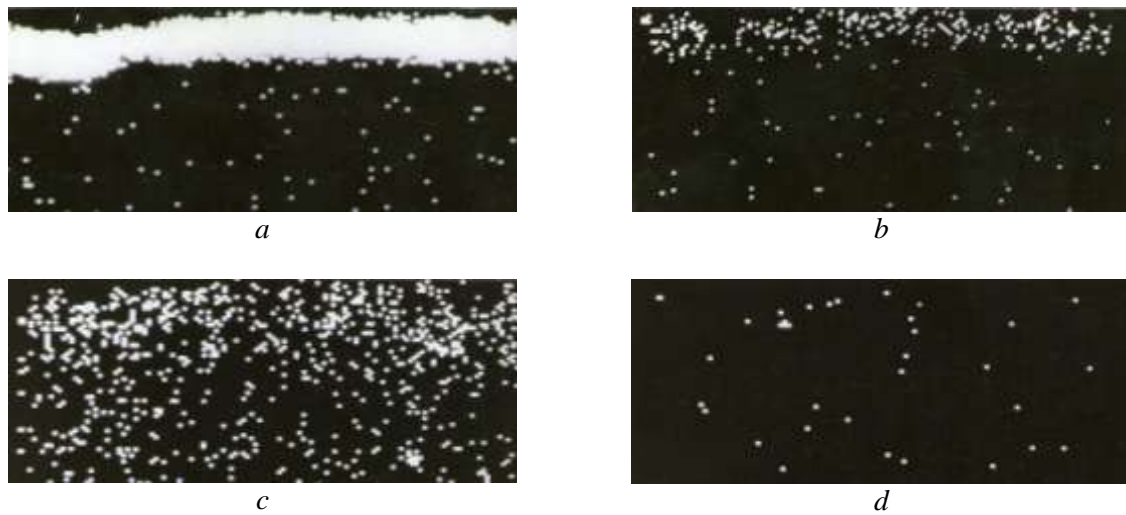


Fig. 4. Microstructures of the coating and surface layer of the sample before operation, photographed in characteristic rays: $a - Ti_{K\alpha}$; $b - N_{K\alpha}$; $c - C_{K\alpha}$; $d - O_{K\alpha}$, $\times 3000$

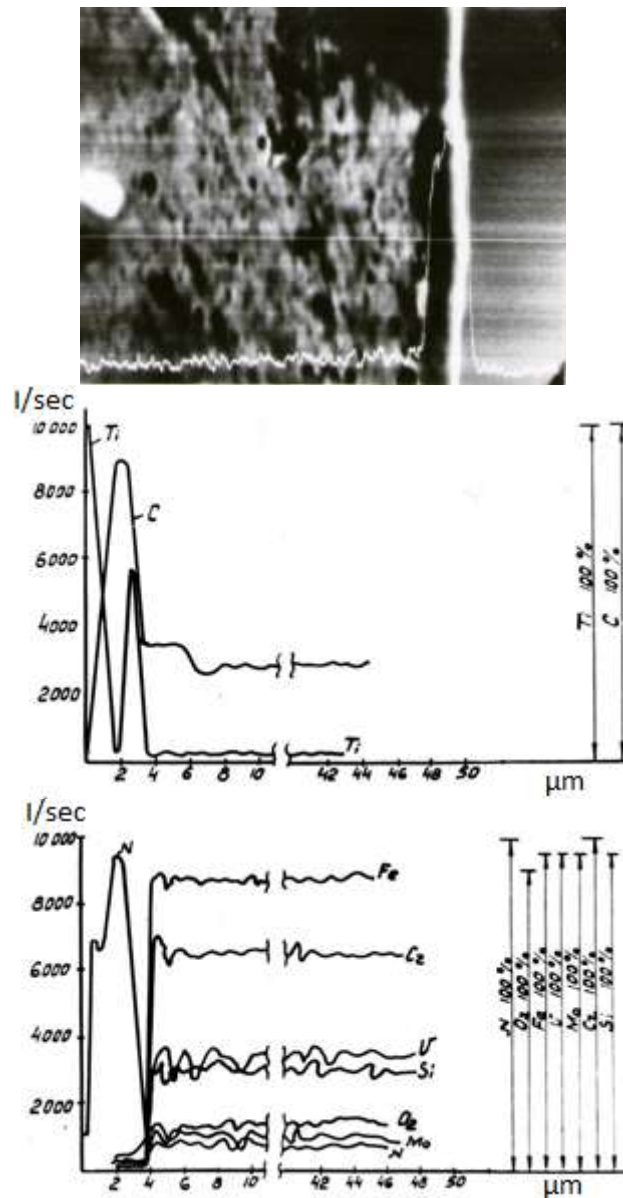


Fig. 5. Distribution of elements along the transition zone coating and the sample matrix, background level on Fe

The results obtained indicate that during the coating process, titanium and nitrogen are not detected in the matrix material, and the distribution of the base elements remains unchanged. Thus, the structure of the original metal from which the mold parts are made does not change. X-ray analysis showed the presence of residual compressive stress in the coating, the value of which is 1800 MPa.

Studies have confirmed that the α -Ti content in the coating gradually decreases in the direction from the substrate to the outer surface. During the ion bombardment process, an α -Ti layer is formed on the surface, while in the condensed coating, a minimal amount of droplet phase containing α -Ti is observed. Due to this, high adhesion of the coating to the substrate and low adhesion to the processed material are achieved, which is critically important for ensuring the durability of the molds [18; 19].

In addition, residual compressive stresses play an important role in increasing the durability of molds. Since tensile stresses are the main cause of failure during injection molding [20], the presence of residual compressive stresses in the coating.

Conclusions

As a result of the research conducted, it was established:

1 the coating was applied to the steel surface heated to 500 °C during ion bombardment. The analysis showed the deposition of the α -Ti phase. At the same time, micro-X-ray spectral analysis did not reveal deep penetration of titanium into the substrate. After ion bombardment, the hardness of the surface layer increases from 480–500 MPa to 1050 MPa;

2 the maximum adhesion activity to the substrate and the effect on increasing the thermal endurance of 4Kh5MFS and 5KhNM steels are achieved with a coating thickness within 2–5 μ m, the application time varied from 12 to 30 minutes;

3 during the coating process, titanium and nitrogen are not detected in the matrix material, and the distribution of the base elements remains unchanged. Thus, the structure of the original metal from which the mold parts are made does not change. X-ray analysis showed the presence of residual compressive stress in the coating, the value of which is 1800 MPa;

4 the fractal dimension of the surface of a 4 μ m thick titanium nitride coating for 4Kh5MFS steel increased compared to the surface after heat treatment from 1.856 to 1.914. Also, the

fractal dimension of the surface of 5KhNM steel after bombardment with titanium ions increased from 1.829 to 1.897. The increase in the hardness of the surface layer from 480–500 MPa to 1050 MPa indicates the possibility of the existence of new connections between the fractal structure and properties.

Література

1. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. 3. 444–452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
2. Vafaeva K. M., Zegait R. *Research in Engineering Structures and Materials*. 2024. 10(2). 559. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.42ma0818rv>
3. Vynogradov O. M. *Reduction of costs for foundry production. Casting of Ukraine*. 2005. 3. 5–8.
4. Rogovyi A., Khovanskyi S., Grechka S., Pitel J. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. 682–691. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_68
5. Rogovyi A. *Energy*. 2018. 163. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.075>
6. Rogovyi A., Korohodskiy V., Khovanskyi S., Hrechka I., Medvediev Y. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1741(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012018>
7. Gladkikh L. I., Malykhyn S. V., Pugache A. T., Reshetnyak O. M., Glushkova D. B., D'Yachenko S. S., Kovtun G. P. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2003. 6(25). 763–776.
8. Hlushkova D. B., Ryzhkov Yu. V., Kostina L. L., Demchenko S. V. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. 1(113). 208–211.
9. Kakimzhanov D., Rakhadilov B., Sulyubayeva L., Dautbekov M. *Coatings*. 2023. 13(11). 1824.
10. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Saenko V. A., Volchuk V.M., Kalinin A.V., Kalinina N.E. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. 144(2). 105. <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
11. Hlushkova D. B., Kalinin A. V., Kalinina N. E., Volchuk V. M., Saenko V. A., Efimenko A. A. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. 144(2). 126. <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
12. Mohamad A., Ivan C., Yuri T. *Fuel*. 2024. 373. 132227. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132227>
13. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svyarenko M. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1741(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
14. Hlushkova D. B., Volchuk V. M., Polyansky P. M., Saenko V. A., Efimenko A. A. *Functional Materials*. 2023. 30(2). 275. <https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>
15. Yanchuk V., Kruhlov I., Zakiev V., Lozova, A., Trembach B., Orlov A., Voloshko S., Metallofiz

- Noveishie Tekhnol. 2022. 44(10). 1275–1292. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.10.1275>
16. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1021(1). 012053. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053>
 17. Reddivari B. R., Vadapalli S., Sanduru B., Buddi T., Vafaeva K. M., Joshi A. Cogent Engineering. 2024. 11(1). 2343586. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586>
 18. Subbotina V., Bilozarov V., Subbotin O., Kniaziev S., Volkov O., Lazorko O. Functional Materials. 2023. 30(4). 590. <https://doi.org/10.15407/fm30.04.590>
 19. Iqbal A., S. Siddique S., Maqsood M., Atiq Ur Rehman M., Yasir M. Coatings. 2020. 10. 1006.
 20. Wang Y., Karasev A., Park J. H., Jönsson P. G. Metall Mater Trans. 2021. B 52. 2892–2925. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7>
 12. Mohamad, A., Ivan, C., Yuri, T. Fuel. 2024. 373. 132227. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132227>
 13. Andrenko, P., Rogovyi, A., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Svynarenko, M. Journal of Physics. Conference Series. 2021. 1741(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
 14. Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M., Polyansky, P. M., Saenko, V. A., Efimenko, A. A. Functional Materials. 2023. 30(2). 275. <https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>
 15. Yanchuk, V., Kruhlov, I., Zakiev, V., Lozova, A., Trembach, B., Orlov, A., Voloshko, S., Metallofiz Noveishie Tekhnol. 2022. 44(10). 1275–1292. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.10.1275>
 16. Volchuk, V. M., Uzlov, O. V., Puchikov, O. V., Ivantsov, S. V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1021(1). 012053. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053>
 17. Reddivari, B. R., Vadapalli, S., Sanduru, B., Buddi, T., Vafaeva, K. M., Joshi, A. Cogent Engineering. 2024. 11(1). 2343586. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586>
 18. Subbotina, V., Bilozarov, V., Subbotin, O., Kniaziev, S., Volkov, O., Lazorko, O. Functional Materials. 2023. 30(4). 590. <https://doi.org/10.15407/fm30.04.590>
 19. Iqbal, A., S. Siddique, S., Maqsood, M., Atiq Ur Rehman, M., Yasir, M. Coatings. 2020. 10. 1006.
 20. Wang, Y., Karasev, A., Park, J. H., Jönsson, P. G. Metall Mater Trans. 2021. B 52. 2892–2925. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7>

References

1. Batygin, Y. V., Golovashchenko, S. F., Gnatov, A. V. Journal of Materials Processing Technology. 2013. 3. 444–452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
2. Vafaeva, K. M., Zegait, R. Research in Engineering Structures and Materials. 2024. 10(2). 559. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.42ma0818rv>
3. Vynogradov, O. M. Reduction of costs for foundry production. Casting of Ukraine. 2005. 3. 5–8.
4. Rogovyi, A., Khovanskyi, S., Grechka, S., Pitel, J. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. 682–691. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_68
5. Rogovyi, A. Energy. 2018. 163. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.075>
6. Rogovyi, A., Korohodskyi, V., Khovanskyi, S., Hrechka, I., Medvediev, Y. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1741(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012018>
7. Gladkikh, L. I., Malykhyn, S. V., Pugache, A. T., Reshetnyak, O. M., Glushkova, D. B., D'Yachenko, S. S., Kovtun, G. P. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2003. 6(25). 763–776.
8. Hlushkova, D. B., Ryzhkov, Yu. V., Kostina, L. L., Demchenko, S. V. Problems of Atomic Science and Technology. 2018. 1(113). 208–211.
9. Kakimzhanov, D., Rakhadilov, B., Sulyubayeva, L., Dautbekov, M. Coatings. 2023. 13(11). 1824.
10. Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Saenko, V. A., Volchuk, V. M., Kalinin, A. V., Kalinina, N. E. Problems of Atomic Science and Technology. 2023. 144(2). 105. <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
11. Hlushkova, D. B., Kalinin, A. V., Kalinina, N. E., Volchuk, V. M., Saenko, V. A., Efimenko, A. A. Problems of Atomic Science and Technology. 2023. 144(2). 126. <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>

Глушкова Діана Борисівна¹, д.т.н., проф., зав. каф. технології металів та матеріалознавства, diana@khadi.kharkov.ua, тел. +38 (057)707-37-29,
Волчук Володимир Миколайович², д.т.н., проф., зав. каф. матеріалознавства та обробки матеріалів, тел. +38 097-334-75-88, volchuk.volodymur@gmail.com,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Арх. О. Петрова, 24-а, м. Дніпро, 49600, Україна.

М

Підвищення термічної витривалості деталей прес-форм лиття під тиском

Анотація. Постановка проблеми. Застосування плазових покриттів, створених на основі зносостійких матеріалів, дає широкі можливості для покращення експлуатаційних властивостей деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування та термічних навантажень. Серед найбільш перспективних методів особливу увагу приділяють хімічному осадженню з газової фази (CVD) та методу конденсації матеріалу в умовах іонного бомбардування. Ці методи дозволяють досягти високої якості покриттів із заданими параметрами товщини, міцності та адгезії. У

цьому дослідженні було використано сталі 4Х5МФС і 5ХНМ для виготовлення прес-форм, призначених для лиття під тиском мідних сплавів. Вибір цих матеріалів обґрунтований їхньою високою термічною витривалістю, міцністю та зносостійкістю. **Мета та задачі дослідження.** Мета – встановити закономірності впливу плазових покриттів на термостійкість матеріалу. Для досягнення мети необхідно: 1 дослідити покриття на поверхні сталі, нагрітої до 500 °С під час іонного бомбардування; 2 визначити максимальну активність зчеплення з підкладкою та вплив на підвищення теплового опору сталей 4Х5МФС та 5ХНМ; 3 провести рентгенівський аналіз покриття в матеріалі матриці; 4 застосувати теорію фракталів для аналізу поверхні покриття нітриду титану та дослідити вплив фрактальної розмірності поверхні на твердість. **Матеріали та методики дослідження.** Нанесення покриття здійснювалося на поверхню сталі, розігріту до 500 °С під час іонного бомбардування. Цей режим сприяв утворенню високоякісної адгезії між підкладкою та покриттям, що є важливим фактором для терміну експлуатації отриманих покриттів. Максимальна адгезійна активність покриттів до підкладки та їхній позитивний вплив на термічну витривалість сталей 4Х5МФС і 5ХНМ були досягнуті за товщини покриття в межах 2–5 мкм. Процес нанесення покриття тривав від 12 до 30 хвилин, що забезпечувало оптимальне співвідношення між якістю покриття та витратами часу на його формування. Під час аналізу структури покриттів було зафіксовано осадження фази α -Ті, яка визначається високою твердістю та термічною стабільністю. Однак у процесі мікрорентгеноспектрального аналізу було визначено, що глибоке проникнення титану в підкладку не відбулося, що свідчить про контрольований процес формування покриття без небажаних дифузійних процесів. **Результати досліджень та їх обговорення.** Після проведення іонного бомбардування було зафіксовано значне підвищення жорсткості поверхневого шару. Спочатку цей показник становив 480–500 МПа, а після оброблення він збільшився до 1050 МПа. Таке підвищення жорсткості сприяє збільшенню опору матеріалу до механічного зношування та покращенню експлуатаційних характеристик прес-форм у реальних виробничих умовах. Дослідження фрактальної структури поверхні покриттів показало, що фрактальна розмірність поверхні покриття з нітриду титану завтовшки 4 мкм, нанесеного на сталь 4Х5МФС, збільшилася з 1,856 до 1,914 на відміну від поверхні після термооброблення. Для сталі 5ХНМ після іонного бомбардування титаном цей параметр збіль-

шився з 1,829 до 1,897. Збільшення фрактальної розмірності свідчить про зміну мікрорельєфу поверхні, що може бути пов'язано з покращенням механічних властивостей покриття. Таким чином, отримані результати підтверджують існування взаємозв'язку між фрактальною структурою покриття та його фізико-механічними характеристиками, що дає можливість для подальших досліджень у цій галузі. **Висновки.** Під час проведених досліджень було визначено таке:

1 покриття наносили на поверхню сталі, нагріту до 500 °С, під час іонного бомбардування. Аналіз показав осадження фази α -Ті. Водночас мікрорентгеноспектральний аналіз не виявив глибокого проникнення титану в підкладку. Після іонного бомбардування твердість поверхневого шару збільшилась з 480–500 МПа до 1050 МПа; 2 максимальна адгезійна активність до основи та вплив на підвищення термостійкості сталей 4Х5МФС і 5ХНМ досягаються за товщини покриття в межах 2–5 мкм, час нанесення варіюється від 12 до 30 хв; 3 під час процесу нанесення покриття титан і азот не виявлені в матеріалі матриці, а розподіл базових елементів залишається незмінним. Таким чином, структура вихідного металу, з якого виготовлені деталі форми, не змінюється. Рентгенівський аналіз показав наявність у покритті залишкової напруги стиску, величина якої становить 1800 МПа; 4 фрактальна розмірність поверхні покриття нітриду титану товщиною 4 мкм для сталі 4Х5МФС збільшилась на відміну від поверхні після термооброблення з 1,856 до 1,914. Також фрактальна розмірність поверхні сталі 5ХНМ після бомбардування іонами титану збільшилась з 1,829 до 1,897. Підвищення твердості поверхневого шару від 480–500 МПа до 1050 МПа вказує на можливість існування нових зв'язків між фрактальною структурою та властивостями.

Ключові слова: плазма, фрактал, структура, твердість, термостійкість, математична модель.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, ORCID: 0000-0001-8612-6584, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua,

Volchuk Volodymyr², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing, ORCID: 0000-0001-7199-192X, e-mail: volchuk.volodymyr@gmail.com,

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-A O. Petrova str., Dnipro 49600, Ukraine.