

Міністерство освіти і науки України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Міжнародної конференції здобувачів вищої освіти і
молодих учених**

**«СУЧАСНІ МАТЕРІАЛИ ТА
ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОБРОБКИ»**

Харків
ХНАДУ
2025

УДК 621.785 + УДК 621.793 + УДК 620.17:621.785 + УДК 620.18:004.8 + УДК 669.15-194.56:620.178.16 + УДК 621.787 + УДК 669.131 + УДК 621.791 + УДК 629.3.027.5-7:620.178.3 + УДК 678.05 + УДК 621.9 + УДК 669.13 + УДК 69.001.5 + УДК 620.198:620.178.3

Сучасні матеріали та технології їх обробки : Збірка наукових праць Міжнародної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Харків, 17-18 квітня 2025 року. Харків, 2025. 109 с.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГЛУШКОВА Діана Борисівна – професор, доктор технічних наук;

БАЙДАЛА Владислава Юріївна – асистент

ЗМІСТ

Вступ	5
Viktor SKRYPNIKOV, Andrii PUTIVSKYI Development and application of steel-molybdenum coating for increasing wear resistance of piston rings	6
Viktor SKRIPNIKOV, Serhii SELEZNIOV Development and investigation of a steel-molybdenum coating deposited by the gas-thermal method	13
Viktor SKRIPNIKOV, Yaroslav VOVK, Diana HLUSHKOVA Durability research of steel-molibdenic and electrolytic chrome coating applied on piston rings	20
Ihor PASTUSHKO, Valeriia SIEROKUROVA Features of laser borating	24
Bohdan SEREDA, Denys LOPARYEV, Tatiana HOVORUN, Khrystyna BERLADIR Mechanisms of strengthening of high-speed steels in the process of ion-plasma nitriding	30
Денис КОЛОБОВ, Ілля МИКИТАН, Владислава БАЙДАЛА Аналіз мікроструктури матеріалів за допомогою штучного інтелекту: нові можливості та перспективи	34
Ігор ПАСТУШКО, Павло ЗЛОБІН Вплив структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих сплавів	39
Артем КРИВЕНКО Дослідження впливу ППД на структуру та властивості поверхневого шару чавунних зубчастих коліс	46
Олександр АРХІПЦЕВ Дослідження іонного азотування інструментальної сталі X12 у схрещених електричних і магнітних полях	54
Антон ЗАВЕЗИСТУП Експрес-діагностика якості та підбір зносостійких матеріалів із застосуванням термоелектричного методу контролю	60
Олександр ВОЗНЮК Збільшення ресурсу осей ремкомплекту підвіски трактора	67
Станіслав ВОРОНКОВ Обґрунтування оптимальних параметрів процесу FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів	73

Діана ПОНОМАРЕНКО	
Підвищення ефективності механічної обробки деталей з марганцевистої сталі	79
Олександр ВЛАСЕНКО	
Підвищення ефективності операцій точіння	83
Віталій БЄЛОКОПИТОВ	
Підвищення ефективності процесу різання за рахунок розробки моделі прогнозування ресурсу інструменту	88
Ярослав КІРІЄНКО	
Підвищення зносостійкості та відновлення зношених поверхонь тертя методами ЕІЛ	92
Олександр ІВАХНЕНКО	
Підвищення якості виливків розподільних валів з чавуну з вермикулярним графітом	99
Іван САВИЦЬКИЙ	
Проект енергоефективного будинку	105
Сергій СЕЛЕЗНЬОВ	
Стан поверхні після іонного бомбардування та її вплив на циклічну довговічність виробу	109
Денис ЛИТОВКА	
Формування пружно-пластичних властивостей полімерних матеріалів термічною обробкою після FDM-друку	115

ВСТУП

17-18 квітня 2025 року на кафедрі технології металів та матеріалознавства імені О. М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету відбулася Міжнародна конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сучасні матеріали та технології їх обробки». На конференції головною темою обговорення стали шляхи збільшення терміну служби деталей машин. Учасники зосередилися на двох ключових аспектах: виборі високоякісних матеріалів і застосуванні ефективних методів обробки, як об'ємної, так і поверхневої. Особливу увагу було приділено поверхневій обробці, яка відіграє важливу роль у підвищенні стійкості до зношування та покращенні загальних механічних характеристик виробів. Серед обговорюваних технологій були іонно-плазмові покриття, іонне бомбардування, поверхнєве пластичне деформування, лазерна обробка та іонна імплантація.

Для зміцнення зовнішнього шару деталей активно використовують методи наплавлення робочих поверхонь і модифікування деталей трибосистем за допомогою висококонцентрованих потоків енергії. Одним з таких методів є детонаційне напилення, що дозволяє створювати покриття з чудовими фізико-механічними та триботехнічними властивостями.

Значну частину конференції було присвячено технологіям зварювання, прогрес у яких має вирішальне значення для розвитку різних галузей промисловості та будівництва.

Учасники конференції провели плідний обмін думками щодо вирішення актуальних питань, пов'язаних з підвищенням довговічності машин, удосконаленням методів поверхневої обробки та розвитком технологій зварювання. Цей обмін виявився надзвичайно корисним та своєчасним.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF STEEL-MOLYBDENUM COATING FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF PISTON RINGS ¹

Viktor SKRIPNIKOV, postgraduate student,
Andrii PUTIVSKYI, student of group MC-21-23
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The steel-molybdenum coating applied to the piston rings group made of high-strength cast iron provides good conformability, low wearability rate, and low coefficient of friction is determined. This fact is explained by the specific characteristics of molybdenum oxides.

Keywords: steel-molybdenum coating, conformability, wearability rate, microhardness, electrolytic bichromated coating.

РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ СТАЛЕВО-МОЛІБДЕНОВОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

Віктор СКРИПНІКОВ, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Андрій ПУТІВСЬКИЙ, здобувач вищої освіти групи MC-21-23
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Сталево-молібденове покриття, нанесене на поршневу групу кілець, виготовлену з високоміцного чавуну, забезпечує хорошу припрацьовуваність, низьку швидкість зношування, а також визначає низький коефіцієнт тертя. Цей факт пояснюється специфічними властивостями оксидів молібдену.

Ключові слова: сталево-молібденове покриття, придатність до оброблення, швидкість зношування, мікротвердість, електролітичне біхромоване покриття.

Topicality

The significant increase of reliability and endurance of units and machine parts is one of the main problems in the development of modern engineering.

This problem can be solved by the urgent development of the new technologies, especially, for the details which work in the condition of friction as well as amortization.

The well-known strengthen technologies have some disadvantages, for example: the microgeometry of details is changed after strengthening, skellering of the of the product's surface and the appearance of stresses inside it, affects the operability of the machine unit, the need to create special and expensive conditions for the process of strengthening, environmental problems, etc.

¹ The work was carried out under the supervision of Professor Diana HLUSHKOVA

This scientific research is devoted to the process of planning and investigation of the structure and the features of piston rings group after coating them with steel-molybdenum.

Research materials and methods

The coatings were applied to the piston rings group made of high-strength cast iron, used in batch production

At the present time the electrolytic bichromated coating is applied to the piston rings group.

That is why the researches were conducted simultaneously with the piston rings group, which were reinforcement according to the proposed technology of hardening, the results of the research were compared by the main features, which characterize serviceability of piston rings group during operation.

The piston rings, which were to be covered with the steel-molybdenum coating, were grouped in twenty items. The assembling of the piston rings group was carried out in a special appliance, imitating the bushing of the working cylinder. Rings on the mandrel were assembled in such a way that there was no opening of the locks.

On the working surfaces of the piston rings group, a special groove is provided under the coating, which increases the adhesion of the coating to the substrate.

The technological process of applying the steel-molybdenum coating to the piston rings group includes the following stages: preliminary cleaning, bead blasting treatment, spraying.

The bead blasting treatment deals with cleaning the surface of the base coat, increase the surface roughness of the substrate, which increases the total area of the coating adhesion sections with the substrate and the adhesion of the coating.

Molybdenum and steel wires were fed at a certain speed. The coating was applied by electric arc spraying on the same mandrel as shot blasting. The molybdenum wire is connected to the positive pole of the power source, the steel wire to the negative pole.

The application modes of the steel-molybdenum coating are given in the Table 1.

Table 1 – The modes of steel-molybdenum coating sputtering

Coating composition, % by weight		Wire diameter, mm		Wire feed speed, m/min		Coating composition, % in volume		Arc voltage, V	Electric current, A	Polarity		Stored air pressure, kgf/sm ²	Diameter of air-blast nozzle, mm	Spraying distance, mm
Mo	St	Mo	St	Mo	St	Mo	St			Mo	St			
50	50	1,5	1,7	3,8	3,8	44	56	35	220	+	-	4,5-5,0	7	100-110
50	50	2,0	2,3	3,8	3,8	44	56	40	400	+	-	5,0-5,5	8	100-110
60	40	1,5	1,7	3,8	2,47	53	47	35	220	+	-	5,0-5,5	7	100-110
60	40	2,0	2,3	3,8	2,47	53	47	40	250	+	-	5,0-5,5	8	100-110
40	60	1,5	1,7	3,8	5,84	33	67	35	220	+	-	5,0-5,5	7	100-110
40	60	2,0	2,3	3,8	5,84	33	67	40	400	+	-	5,0-5,5	8	100-110

The temperature of the piston rings group during the application of the steel-molybdenum coating is 150°C. The coating was sprayed to a thickness of 0.8 mm. After the coating was applied, a

mechanical treatment was carried out. The thickness of the coating in the final finished ring is 0.5 ± 0.1 mm.

Research results and their discussion

The structure of the steel-molybdenum coating was studied using a metallographic microscope with an increase from $\times 100$ to $\times 300$.

The microstructure of the coating has a typical character of gas thermal coats layered with uniformly spaced pores (Figure 1).

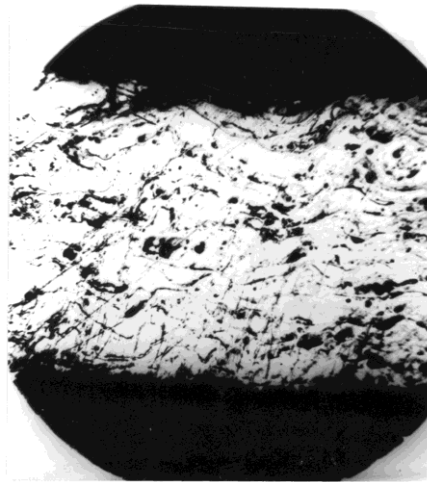


Figure 1 – The microstructure of steel-molybdenum coating, $\times 115$

The industrial etching of the samples was carried out with a Murakama reagent (10 g NaOH, 10 g $K_3Fe(CN)_3$, 10 ml H_2O), which is used to reveal the structure of Mo and other refractory materials.

The structure of the steel-molybdenum coating after etching is shown at the Figure 2. The microstructure of the coating is a combination of molybdenum (dark, etching areas) and steel (light, non-etching areas).

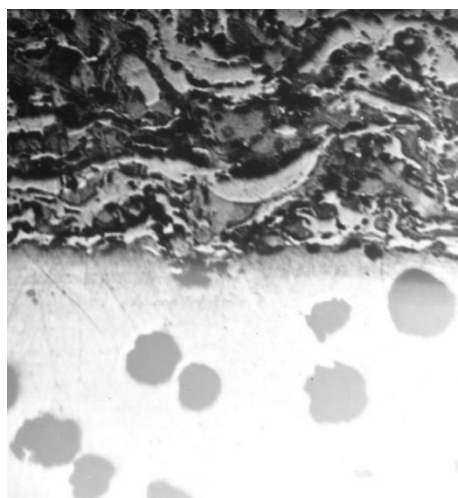


Figure 2 – The microstructure of steel-molybdenum coating by etching, $\times 115$

The large-dispersed component of molybdenum appears with a larger increase in the structure of the coating, apparently, due to the high rates of crystallization during the coating process (Figure 3).

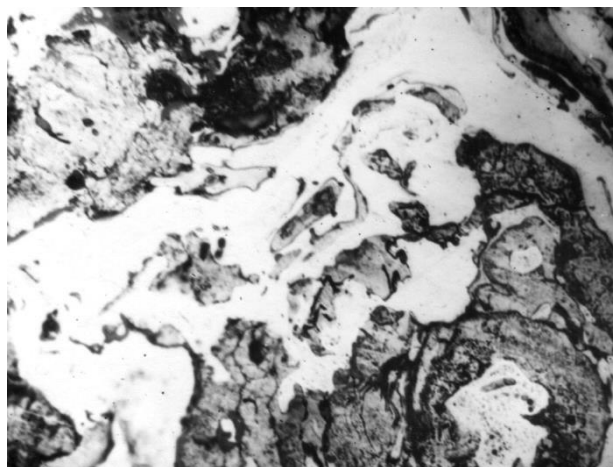


Figure 3 – The microstructure of steel-molybdenum coating's surface layer, $\times 400$

Besides the two main phases, the other structural components are observed in the coating, which are to be the products of the interaction of steel and molybdenum wires with oxygen and nitrogen, as well as products of interaction between molybdenum and steel in the process of plasma spraying.

The pore size of the coating is $5 \dots 10 \cdot 10^{-6}$ m, which is optimal for piston ring group operating with significant force and temperature loads.

The porosity of the coating (up to 12 %) provides an increased oil consumption of the rings, which positively affect both the process of running-in of the working pair of the sleeve-the piston ring and the operation of the piston ring group during operation.

The control of the adhesion strength of the steel-molybdenum coating to the substrate is carried out on a special device by twisting the piston ring group with simultaneous bending until the coating was peeled off. The angle of twist at which the coatings were peeled off is not less than 35° , which indicates satisfactory adhesion of the coatings.

The measurement of microhardness showed that for molybdenum it is $H\mu = 550 \dots 590$, for steel $H\mu = 460 \dots 560$ by the thickness of the coating.

The microhardness of molybdenum increased to $H\mu = 720 \dots 760$, and steel – to $H\mu = 520 \dots 580$. After the tests for wearability.

In order to determine the antifriction properties of the received steel-molybdenum coating of piston ring group and the propensity to grasp it with the sleeve the tests were conducted to determine the dependence of the friction coefficient on the load. Samples cut from the chrome and the steel-molybdenum ring group were tested, when rubbing in pair with disc samples from cast iron. The investigations were carried out by using a SMC-2 friction machine under step loading. Lubrication with oil was carried out by dipping, as well as applying it to the working surfaces of the samples before testing. The results of the tests are shown in Table 2.

The obtained data indicate that the steel-molybdenum coating does not adhere to the sleeve cast iron in the entire range of loads. And when rubbing under more severe conditions (with a single lubrication before the test), the friction coefficient at high loads is even less than with excessive

lubrication. At the same time, samples of chromium-plated rings can withstand less stresses prior to bulging working under more severe conditions.

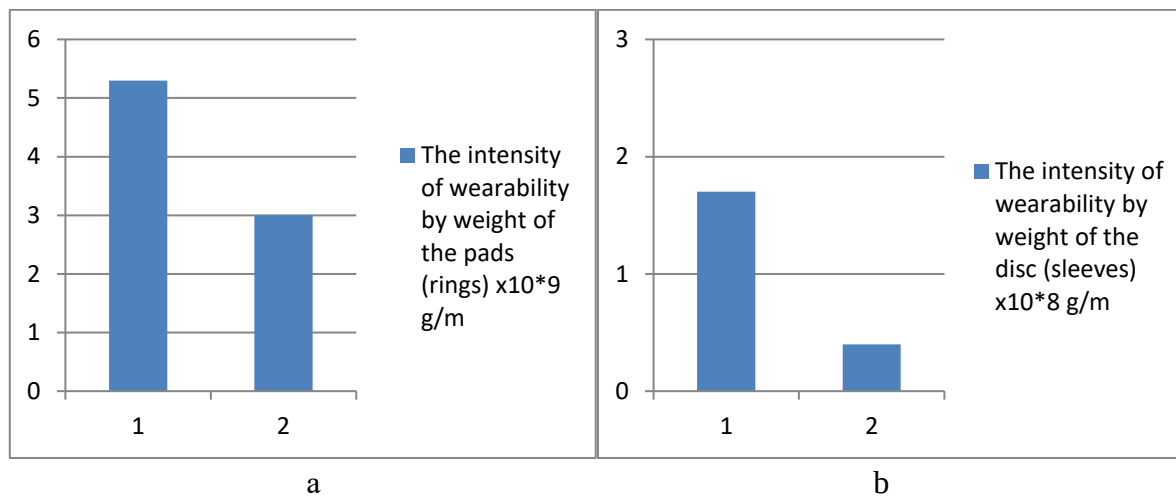
Table 2 – The dependence of friction ratio on the load

Ring	Lubricants	Friction ratio at the load P , kN									
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Chromium	Dipping	0,079	0,077	0,082	0,077	0,074	Tearing				
Steel-molybdenum coating	–	0,066	0,068	0,072	0,070	0,070	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
Chromium	Applying	0,098	0,099	0,103	Tearing						
Steel-molybdenum coating	–	0,068	0,069	0,070	0,070	0,072	0,072	0,062	0,067	0,067	0,065

Thus, the obtained results indicate a higher resistance to corrosion and better antifriction characteristics of piston rings with a steel-molybdenum coating in comparison with electrolytic chromium plating.

The durability tests were carried out in comparison with chrome-plated piston rings in order to determine the wearability and wear resistance of a steel-molybdenum coating, when it was paired with a sleeve. The test was carried out on a CMC-2 machine with reciprocating motion for two hours under load 1 kN and a sliding speed of 1.3 m/h. Lubrication – immersion in oil.

The wear rate by the mass of the disc (liner) and the shoe (ring) treated by the existing technology (electrolytic chromium plating) and after the application of the steel-molybdenum coating are presented for comparison of the histogram in Figure 4.

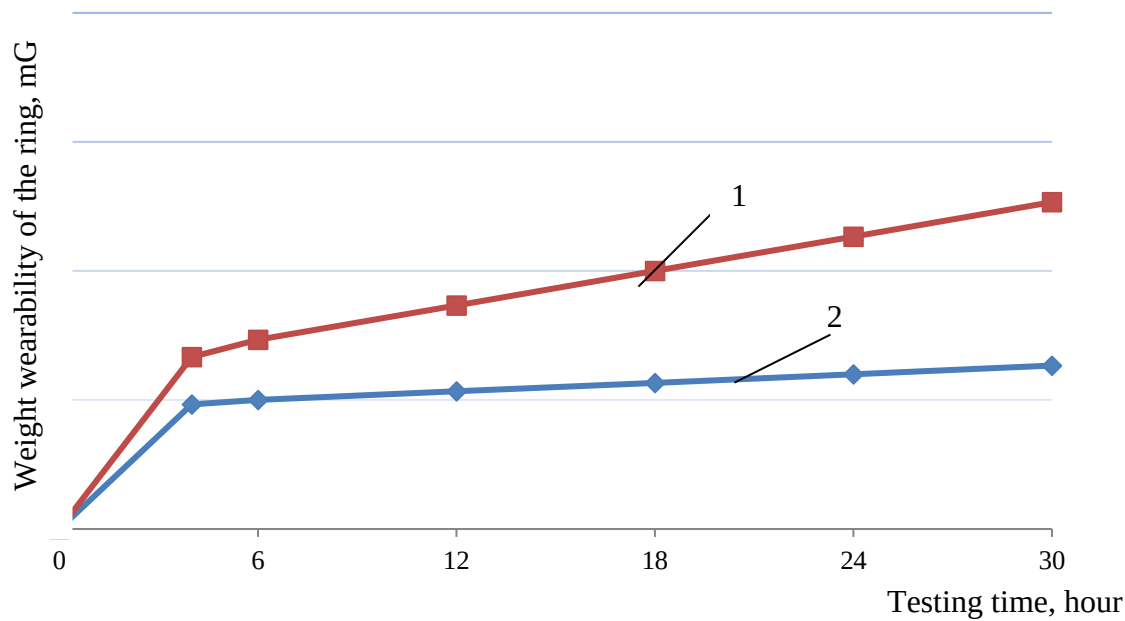


1 – chrome plated coating; 2 – steel-molybdenum coating

Figure 4 – The histogram of the intensity of wearability by weight of the pads (rings) «a» and the disc (sleeves) «b»

The results indicate that the steel-molybdenum coating is more wear-resistant than electrolytically chrome plated. The steel-molybdenum coating minimizes the mating material to a lesser extent and has a lower coefficient of friction

In Figure 5 depicts the dependence of the wearability of the piston ring group, chromed and with a steel-molybdenum coating, on the test time is in the fig. 5.



1 – chrome ring; 2 – ring with steel-molybdenum coating

Figure 5 – The dependence of wearability of piston ring group on test time

The analysis of the obtained results testifies to faster workability of piston ring group with the steel-molybdenum coating. For a piston ring group with a steel-molybdenum coating, a lower wear rate is also characteristic, which is confirmed by the obtained data on the good antifriction properties of these coatings.

Such a complex of parameters of steel-molybdenum coating can be explained by the specific properties of molybdenum oxides, which can have an additional lubricating effect, acting as a solid lubricant. In addition, the high melting point of molybdenum (2600°C) contributes to a lesser propensity to set (weld) the mating materials.

The difference in the parameters of the crystalline structure of molybdenum and Fe_α , which is the basis of the metallic matrix of cast iron facilitated decrease in setting. Molybdenum crystallizes with the formation of a body-centered cubic lattice with a period $a = 3.1474$, whereas in Fe_α $a = 2.8665$ (in chromium, the lattice period is $a = 2.8829$).

Conclusions

1. The technology for applying a steel-molybdenum coating is proposed.
2. The investigation of the structure of the steel-molybdenum coating showed that it has a heterophase structure.
3. The porosity of steel-molybdenum coating provides increased oil consumption of the rings, which positively affects the process of running-in of the working pair of the cartridge-piston ring.
4. The coefficient of friction of the steel-molybdenum coating is 20 % lower than that of the chrome plated coating for all the studied loads.
5. The wear rate of the chrome ring is 2 times higher than that of the ring with a steel-molybdenum coating.
6. The piston ring group with a steel-molybdenum coating are characterized by faster workability than rings with chrome plated coating.

7. The basis for a higher complex of antifriction properties and wear resistance of piston rings with a steel-molybdenum coating as compared to chrome plated is given.

References

1. Rukhande S., Rathod W. S., Bhosale D. G. Tribological Behaviour of Thermally Sprayed Coatings: A Review. *SSRN Electronic Journal*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3323697>.
2. Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based Composite Coatings Prepared by High-Velocity Arc Spraying / J. Liu et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31, no. 3. P. 644–657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01338-8>.
3. Effect of Molybdenum Content on Mechanical and Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Coatings over Titanium β -21S Alloy / D. B. Padmanaban та ін. *C*. 2020. Т. 7, № 1. С. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/c7010001>.
4. Microstructure and Wear Behaviors of Plasma-Sprayed MoAlB Ceramic Coating / F. Li et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11040474>.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A STEEL-MOLYBDENUM COATING DEPOSITED BY THE GAS-THERMAL METHOD ²

Viktor SKRIPNIKOV, postgraduate student,
Serhii SELEZNIOV, student of group MC-21-23
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The steel-molybdenum coating applied to the piston ring group made of high-strength cast iron provides good conformability, low wearability rate, and low coefficient of friction is determined. This fact is explained by the specific characteristics of molybdenum oxides.

Keywords: steel-molybdenum coating, conformability, wearability rate, microhardness, characteristics of molybdenum oxides.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕВО-МОЛІБДЕНОВОГО ПОКРИТТЯ, НАНЕСЕНОГО ГАЗОТЕРМІЧНИМ МЕТОДОМ

Віктор СКРИПНІКОВ, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Сергій СЕЛЕЗНЬОВ, здобувач вищої освіти групи МС-21-23
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Сталево-молібденове покриття, нанесене на поршневу групу кілець, виготовлену з високоміцного чавуну, забезпечує хорошу припрацьовуваність, низьку швидкість зношування, а також визначає низький коефіцієнт тертя. Цей факт пояснюється специфічними характеристиками оксидів молібдену.

Ключові слова: сталь-молібденове покриття, припрацьовуваність, швидкість зношування, мікротвердість, властивості оксидів молібдену.

Analysis of publications

Significantly improving the reliability and durability of machined components and parts is one of the main challenges for the development of modern engineering.

This problem can be solved through the urgent development of new technologies, especially for parts that operate under friction and depreciation.

The known hardening technologies have a number of disadvantages, such as changes in the microgeometry of parts after hardening, weakening of the product surface and the appearance of stresses inside it, which affects the performance of the machine assembly, the need to create special and expensive conditions for the hardening process, environmental problems, etc.

² The work was carried out under the supervision of Professor Diana HLUSHKOVA

This scientific study is devoted to the process of planning and studying the structure and properties of piston rings after applying steel-molybdenum coatings to them.

Research materials and methods

The coating was applied to a group of piston rings made of high-strength cast iron used in mass production

Currently, an electrolytic bichrome coating is being applied to a group of piston rings.

Therefore, the research was carried out simultaneously with a group of piston rings that were strengthened using the proposed strengthening technology, and the research results were compared with the main features that characterise the performance of a group of piston rings during operation.

The piston rings, which were to be coated with a steel-molybdenum coating, were grouped in twenty pieces. The group of piston rings was assembled in a special fixture that imitates the bushing of a working cylinder. The rings on the mandrel were assembled in such a way that the locks were not opened.

The working surfaces of the piston rings have a special groove for the coating, which increases the adhesion of the coating to the base.

The technological process of applying steel-molybdenum coating to piston rings includes the following stages: preliminary cleaning, shot blasting, and spraying.

Shot blasting involves cleaning the surface of the base coating, increasing the surface roughness of the substrate, which increases the total area of the coating adhesion to the substrate and the coating adhesion.

The molybdenum and steel wire were fed at a certain speed. The coating was applied by electric arc spraying on the same mandrel as the shot blasting. The molybdenum wire was connected to the positive pole of the power supply, and the steel wire to the negative pole.

The modes of applying the steel-molybdenum coating are shown in Table 1.

Table 1 – The modes of steel-molybdenum coating sputtering

Coating composition, % by weight		Wire diameter, mm		Wire feed speed, m/min		Coating composition, % in volume		Arc voltage, V	Electric current, A	Polarity		Stored air pressure, kgf/sm ²	Diameter of air-blast nozzle, mm	Spraying distance, mm
Mo	St	Mo	St	Mo	St	Mo	St			Mo	St			
50	50	1,5	1,7	3,8	3,8	44	56	35	220	+	-	4,5-5,0	7	100-110
50	50	2,0	2,3	3,8	3,8	44	56	40	400	+	-	5,0-5,5	8	100-110
60	40	1,5	1,7	3,8	2,47	53	47	35	220	+	-	5,0-5,5	7	100-110
60	40	2,0	2,3	3,8	2,47	53	47	40	250	+	-	5,0-5,5	8	100-110
40	60	1,5	1,7	3,8	5,84	33	67	35	220	+	-	5,0-5,5	7	100-110
40	60	2,0	2,3	3,8	5,84	33	67	40	400	+	-	5,0-5,5	8	100-110

The temperature of the piston ring group during the application of the steel-molybdenum coating is 150°C. The coating was applied by spraying to a thickness of 0.8 mm. After the coating

was applied, machining was performed. The thickness of the coating in the final finished ring is 0.5 ± 0.1 mm.

Research results and their discussion

The structure of the steel-molybdenum coating was examined using a metallographic microscope with a magnification of $\times 100$ to $\times 300$.

The microstructure of the coating has a typical character of gas-thermal coatings, layered with evenly spaced pores (Figure 1).

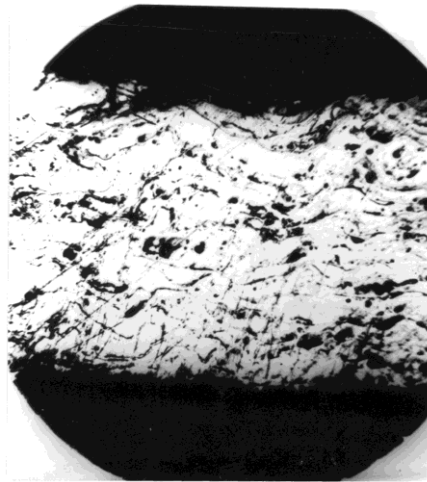


Figure 1 – The microstructure of steel-molybdenum coating, $\times 115$

Industrial etching of the samples was carried out with Murakama's reagent (10 g NaOH, 10 g $K_3Fe(CN)_3$, 10 ml H_2O), which is used to determine the structure of molybdenum and other refractories.

The structure of the steel-molybdenum coating after pickling is shown in Figure 2. The microstructure of the coating is a combination of molybdenum (dark, etched areas) and steel (light, unetched areas).

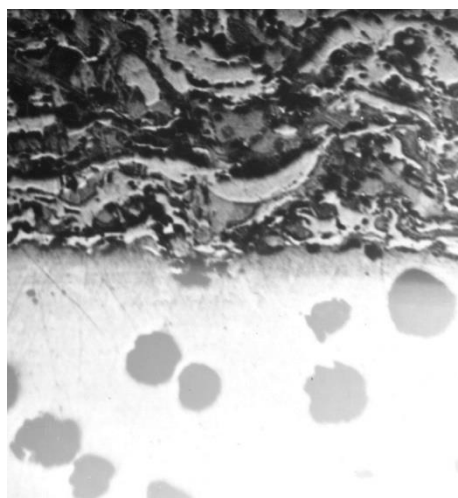


Figure 2 – The microstructure of steel-molybdenum coating by etching, $\times 115$

The coarse molybdenum component appears with a greater increase in the coating structure, apparently due to the high crystallisation rate during the coating process (Figure 3). In addition to the two main phases, other structural components are observed in the coating, which must be products of the interaction of steel and molybdenum wires with oxygen and nitrogen, as well as products of the interaction of molybdenum steel during the plasma spraying process.

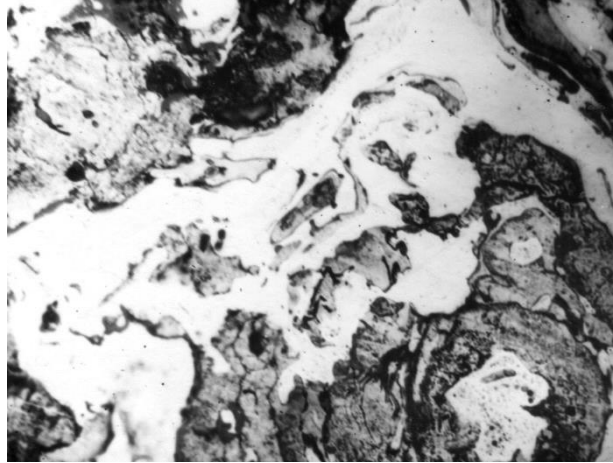


Figure 3 – The microstructure of steel-molybdenum coating's surface layer, $\times 400$

The pore size of the coating is $5 \dots 10 \cdot 10^{-6}$ m, which is optimal for the piston-ring group operating under significant power and temperature loads.

The porosity of the coating (up to 12 %) provides increased oil capacity of the rings, which has a positive effect on the process of running-in of the liner-piston ring working pair and on the operation of the piston-ring group during operation.

The adhesion strength of the steel-molybdenum coating to the substrate is checked using a special device by twisting the piston ring group and simultaneously bending it until the coating peels off. The twisting angle at which the coating peels off is at least 35° , which indicates satisfactory adhesion of the coatings.

The measurement of microhardness showed that for molybdenum it is $H\mu = 550 \dots 590$, for steel $H\mu = 460 \dots 560$ by the thickness of the coating.

The microhardness of molybdenum increased to $H\mu = 720 \dots 760$, and steel – to $H\mu = 520 \dots 580$. After the tests for wearability.

In order to determine the antifriction properties of the obtained steel-molybdenum coating of piston rings and its tendency to engage with the liner, tests were carried out to determine the dependence of the friction coefficient on the load. Samples cut from chromium and steel-molybdenum ring groups were tested under friction in conjunction with disc samples made of cast iron. The research was carried out on the SMC-2 friction machine under step load. The oil was lubricated by immersion and applied to the working surfaces of the samples before testing. The test results are shown in Table 2.

The data obtained indicate that the steel-molybdenum coating does not stick to the cast iron of the liner over the entire load range. And when friction occurs under more severe conditions (with a single lubrication before the test), the friction coefficient at high loads is even lower than with excessive lubrication. At the same time, samples of chrome rings can withstand lower loads before bulging, working in more severe conditions.

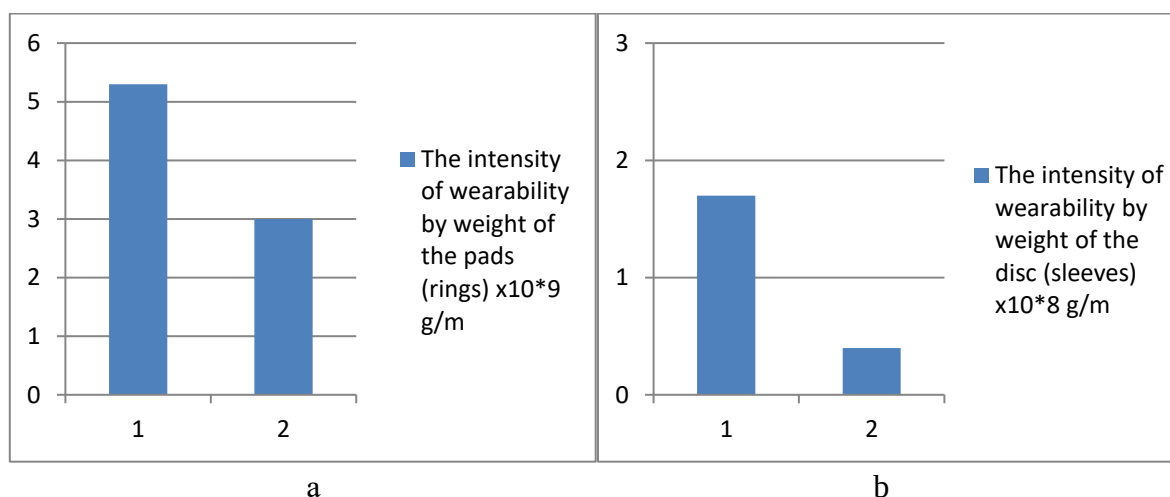
Table 2 – The dependence of friction ratio on the load

Ring	Lubricants	Friction ratio at the load P , kN									
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Chromium	Dipping	0,079	0,077	0,082	0,077	0,074	Tearing				
Steel-molybdenum coating	–	0,066	0,068	0,072	0,070	0,070	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
Chromium	Applying	0,098	0,099	0,103	Tearing						
Steel-molybdenum coating	–	0,068	0,069	0,070	0,070	0,072	0,072	0,062	0,067	0,067	0,065

Thus, the results obtained indicate higher corrosion resistance and better anti-friction characteristics of steel-molybdenum-coated piston rings compared to electrolytic chrome plating.

Durability tests were carried out in comparison with chrome-plated piston rings to determine the wear resistance and wear resistance of the steel-molybdenum coating in combination with the liner. The tests were carried out on a CMC-2 reciprocating machine for two hours at a load of 1 kN and a sliding speed of 1.3 m/h. Lubrication was by immersion in oil.

The wear rate by weight of the disc (liner) and pad (ring) treated with the existing technology (electrolytic chrome plating) and after applying the steel-molybdenum coating is shown for comparison in the histogram in Figure 4.



1 – chrome plated coating; 2 – steel-molybdenum coating

Figure 4 – The histogram of the intensity of wearability by weight of the pads (rings) «a» and the disc (sleeves) «b»

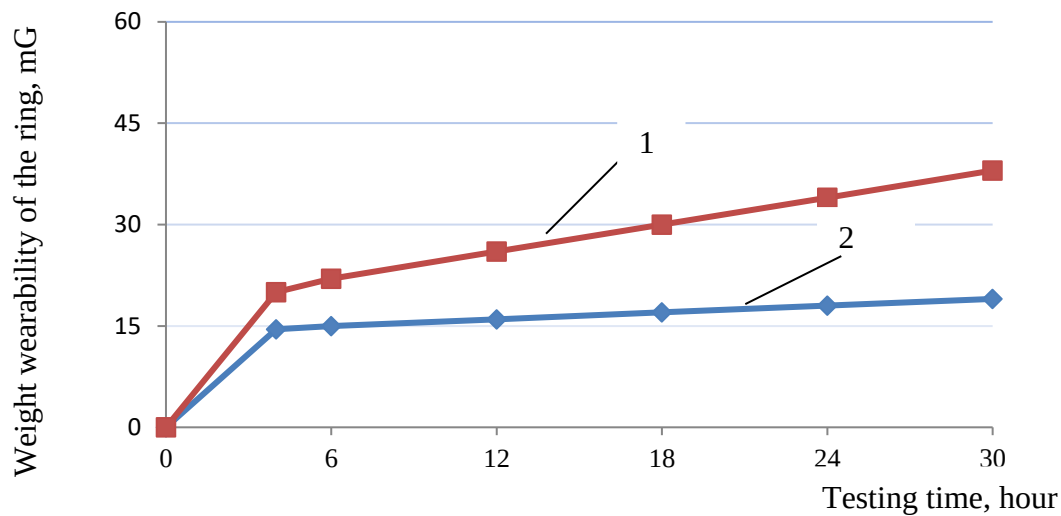
The results show that the steel-molybdenum coating is more wear-resistant than electrolytic chrome plating. The steel-molybdenum coating minimises the wear of the mating material to a lesser extent and has a lower coefficient of friction.

Figure 5 shows the dependence of the wear of a chrome-plated and steel-molybdenum-coated piston group on the test time.

The analysis of the results shows that the piston rings with steel-molybdenum coatings have faster wear. The group of steel-molybdenum-coated piston rings is also characterised by a lower wear rate, which is confirmed by the data obtained on the good antifriction properties of these coatings.

This set of parameters of steel-molybdenum coatings can be explained by the specific properties of molybdenum oxides, which can have an additional lubricating effect by acting as a solid

lubricant. In addition, the high melting point of molybdenum (2600°C) contributes to a lower tendency to adhere (welding) of the materials being joined.



1 – chrome ring; 2 – ring with steel-molybdenum coating
Figure 5 – The dependence of wearability of piston ring group on test time

The difference in the parameters of the crystal structure of molybdenum and Fe_α , which is the basis of the cast iron metal matrix, contributed to a decrease in the setting rate. Molybdenum crystallises to form a face-centred cubic lattice with a period of $a = 3.1474$, while Fe_α has a period of $a = 2.8665$ (chromium has a lattice period of $a = 2.8829$).

Conclusions

1. The technology of applying steel-molybdenum coating is proposed.
2. The study of the structure of the steel-molybdenum coating showed that it has a heterophase structure.
3. The porosity of the steel-molybdenum coating provides increased oil consumption of the rings, which positively affects the process of running-in of the working pair liner-piston ring.
4. The coefficient of friction of the Steel-molybdenum coating is 20 % lower than that of the chrome coating for all studied loads.
5. The wear rate of a chrome-plated ring is 2 times higher than that of a steel-molybdenum-coated ring.
6. Steel-molybdenum-coated piston rings are characterised by higher wear resistance than chrome-coated rings.
7. A higher complex of antifriction properties and wear resistance of piston rings Steel-molybdenum coating compared to chrome-coated ones have been substantiated.

References

1. Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based- Al_2O_3 - B_4C Composite Coatings Prepared by High-Velocity Arc Spraying / H. Li et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12, no. 12. P. 1956. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12121956>.

2. Tribological properties of molybdenum disulfide films doped with amorphous carbon in vacuum and high-temperature environments / F. SU et al. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*. 2025. Vol. 65, no. 2. P. 298–311. DOI: <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.21.044>.

3. Microstructure and Wear Behaviors of Plasma-Sprayed MoAlB Ceramic Coating / F. Li et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11040474>.

DURABILITY RESEARCH OF STEEL-MOLIBDENIC AND ELECTROLYTIC CHROME COATING APPLIED ON PISTON RINGS ³

Viktor SKRIPNIKOV, postgraduate student,
Yaroslav VOVK, student of group MC-31-22,
Diana HLUSHKOVA, Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. *It is determined that iron-molibdenic coating, which is applied on the surface of piston rings made of high-test cast iron, provides good running-in, low intensity of wearing, low coefficient of friction. This fact is explained by specific properties of molibdenic oxide.*

Keywords: *steel-molibdenic coating, running-in, rate of wear, micro-hardness, electrolytic chrome coating.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕМОЛІБДЕНОВОГО ТА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ХРОМОВОГО ПОКРИТТЯ, НАНЕСЕНОГО НА ПОРШНЕВІ КІЛЬЦЯ

Віктор СКРИПНІКОВ, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Ярослав ВОВК, здобувач вищої освіти групи MC-31-22,
Діана ГЛУШКОВА, професор
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Встановлено, що стале молібденове покриття, що нанесено на поршневі кільця з високоміцного чавуну, забезпечує добру пропрацьованість, малу інтенсивність зношування, малий коефіцієнт тертя. Цей факт обґрунтовується специфічними властивостями окислів молібдену.*

Ключові слова: *сталево-молібденове покриття, припрацювання, інтенсивність зношування, мікротвердість, електролітичне хромування.*

Research results and their discussion

For machine parts, operating in conditions of friction and wear, such as piston rings, one of the main operational properties is durability.

Up-to-date reinforcement technology has a number of drawbacks. In this paper, there has been made a comparison of properties of durability obtained while using the technology in question – steel-molybdenum coating.

Coating was applied to piston rings made of high-test cast iron used in mass production.

³ The work was carried out under the supervision of Professor Diana HLUSHKOVA

The technological process of applying steel-molybdenum coating includes the following steps: pre-treatment, shot blasting and spraying properly.

Shot blasting is intended for cleaning the substrate, increasing the surface roughness of the substrate, which increases the total area of coating coupling portions with the base coating and coating adhesion.

Steel and molibdenic wires were fed at a certain speed. Coating was applied by arc spraying on the same mandrel as blasting. The molibdenic wire was attached to the positive side of the supply, the steel wire – to the negative one.

The temperature of the piston ring in the process of steel-molibdenic coating applying is 150°C. Coating was sprayed to the thickness of 0.8 mm. After being coated, the piston ring was resurfaced. The coating thickness has finally finished ring is 0.5 ± 0.1 mm.

In order to determine the anti-friction properties of compared coatings and their tendency to grasp the sleeve, there were conducted tests to determine the dependence of the friction coefficient on the load by using the SMC-2 friction machine at stepped loading. The test results are shown in Table 1.

Table 1 – Dependence of the friction coefficient on loads

Ring	Lubrication	Friction coefficient under load P , kN									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Chromium-plated	Dipping	0,079	0,077	0,082	0,077	0,074	scoring				
Steel-molibdenic	Dipping	0,066	0,068	0,072	0,070	0,070	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
Chromium plated	Lubrication	0,098	0,099	0,103	scoring						
Steel-molibdenic	Lubrication	0,068	0,069	0,070	0,070	0,072	0,072	0,072	0,067	0,067	0,065

The data obtained proves that the steel-molibdenic coating is not grasped by the cast iron of the sleeve within the entire load range. It occurs at friction under tougher conditions (with a single lubrication before the test) by friction coefficient with abundant lubrication. At the same time, samples of chromium-plated rings when operating under more ardent conditions resist lower loading before scoring occurs.

Thus, the results obtained indicate a higher resistance to scoring and better anti-friction characteristics of piston rings with steel-molibdenic coating in comparison with the electrolytic chrome plating.

Comparative tests for durability and wear ability of steel-molibdenic coating for burnishing it with the sleeve in comparison with chromium-plated piston rings are carried out.

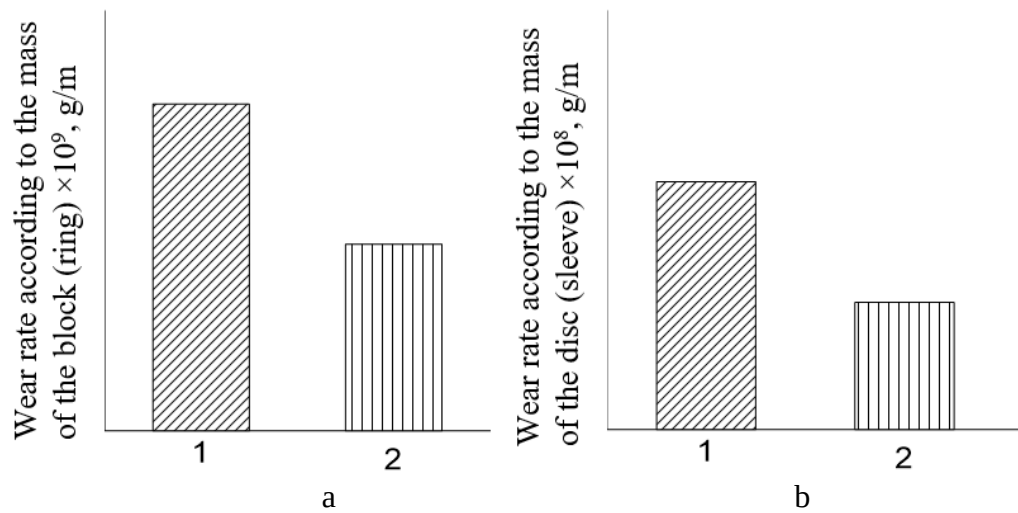
The load constituted 1 kN, the sliding velocity – 1.3 m/s.

In Figure 1 there are shown for comparison histograms of the rate of wear according to the mass of the disk (sleeve) and the block (ring) with electrolytic plating and steel-molibdenic coating.

The analysis of the results obtained indicates that the steel-molibdenic coating is more durable than the electrolytic plating. Steel-molibdenic coating results in less wear of the matching material surface.

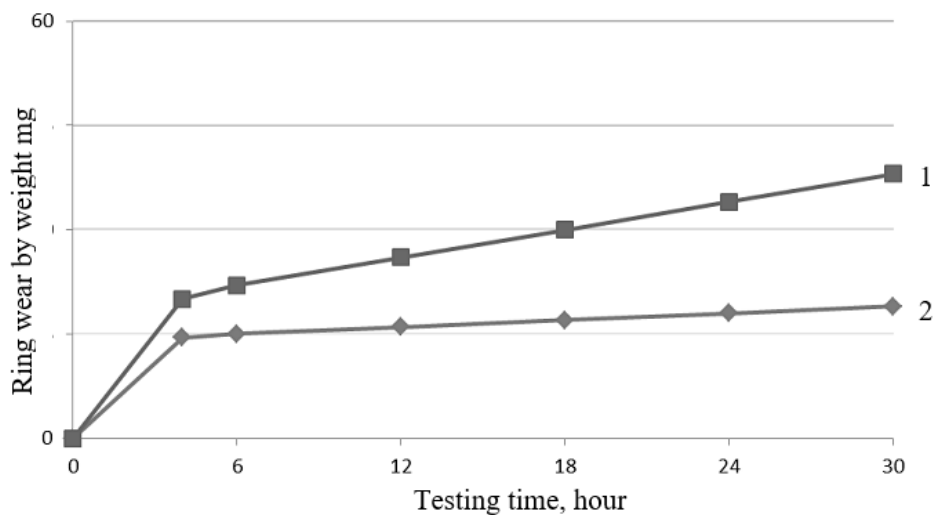
In Figure 2 it is shown the dependence of piston ring wear, chrome-plated and steel-molibdenic ones, from the beginning of the test.

The analysis of the results obtained indicates a more rapid run-in with steel-molibdenic piston ring coating.



1 – chromium coating; 2 – steel-molibdenic coating

Figure 1 – Histograms of the wear rate according to the weight of the block (ring) (a) and the disc (sleeve) (b)



1 – Chromium-plated ring; 2 – Ring with steel-molibdenic coating

Figure 2 – Dependence of piston rings wear on the time of test conducting

A set of such indicators of steel-molibdenic coating can be explained by specific properties of molybdenum oxides, which can provide additional lubricity. In addition, the high melting point of molybdenum (2600°C) contributes less to grasping of (fusion) mating materials.

Conclusions

1. There was offered the technology of steel-molibdenic coating applying.
2. Under all investigated loads by the coefficient of friction steel-molibdenic coating is 20 % lower than the chromium plated one.
3. The rate of chromium plated ring wear is 2 times higher than that of the steel-molibdenic ring.
4. Piston rings with steel-molibdenic coating differ for more rapid running-in ability (conformability) than the chromium-plated ones.

5. The substantiation of a higher complex of antifriction properties and wear resistance of piston rings with steel-molibdenic coating in comparison with the chromium-plated ones is presented.

References

1. Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based-Al₂O₃-B₄C Composite Coatings Prepared by High-Velocity Arc Spraying / H. Li et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12, no. 12. P. 1956. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12121956>.
2. Microstructure and Wear Behaviors of Plasma-Sprayed MoAlB Ceramic Coating / F. Li et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11040474>.
3. Watson M., Marshall M. A Novel Image Segmentation Approach for Microstructure Modelling. *Coatings*. 2017. Vol. 7, no. 10. P. 166. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings7100166>.
4. Wear resistance of hard chrome coatings for piston rings / R. Singh et al. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 04, no. 04. P. 1359–1362. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4281.pdf>.
5. An Ancient Egyptian Multilayered Polychrome Wooden Sculpture Belonging to the Museo Egizio of Torino: Characterization of Painting Materials and Design of Cleaning Processes by Means of Highly Retentive Hydrogels / N. Manfredda et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 11. P. 1335. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11111335>.

FEATURES OF LASER BORATING ⁴

**Ihor PASTUSHKO, postgraduate student,
Valeriia SIEROKUROVA, student of group MC-21-23
Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. Piston rings in the process of operation are subject to wear. Non-sufficient wear resistance of piston ring materials often limits the growth of productivity of machines and the timing of their operation. It is not always that the desired set of properties of piston rings made of cast iron can be achieved by traditional methods of thermal or chemical-thermal treatment. Thus, application of traditional boriding methods associated with diffusion of boron into the solid phase leads to formation of the working layer having high brittleness. Therefore, the actuality of the problem is to increase the wear resistance of piston rings without embrittlement. Use of laser heating at boriding provides the formation of a new layer with special properties. However, the optimum properties can only be achieved after establishing a relationship between the parameters of running a process and the depth of the borated layer. The goal was to determine the effect of laser heating parameters on the structure and depth of the borated layer, since the properties of piston rings depend on the depth of the latter. The studies conducted revealed that the increase in the speed of displacement of the part in the process of laser heating reduces the depth of the borated layer. Such a dependence is observed both at 0.15 mm thickness of coating and at a thickness of 0.30 mm. For all modes of workpiece displacement speed for the used boron containing envelope with the above-specified thickness a higher thickness of the borated layer and the heat affected area corresponds to a higher thickness of coating. Increase of the spot size leads to an increase in the depth of the layer. By X-ray and metallographic diffraction there were decoded the phases and structural constituents of the borated layer. X-ray diffraction and microstructural analysis revealed an association between the exposure speed and share of high-boron layer structures. It is shown that the borated layer in the ductile iron includes such phases as FeB, Fe₂B, α -phase, and borocementite Fe₃(B, C). The research results can be extended to other parts subject to intensive wear.

Keywords: piston rings, borated layer, laser heating.

ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО БОРУВАННЯ

**Ігор ПАСТУШКО, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Валерія СІРОКУРОВА, здобувачка вищої освіти групи МС-21-23
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Поршневі кільця в процесі експлуатації піддаються зношуванню. Недостатня зносостійкість матеріалів поршневих кілець часто обмежує зростання продуктивності машин і терміни їх експлуатації. Не завжди бажаний комплекс властивостей поршневих

⁴ The work was carried out under the supervision of Professor Diana HLUSHKOVA

кілець з чавуну може бути досягнутий традиційними методами термічної або хіміко-термічної обробки. Так, застосування традиційних методів борування, пов'язаних з дифузією бору в тверду фазу, призводить до формування робочого шару з високою крихкістю. Тому актуальною проблемою є підвищення зносостійкості поршневих кілець без окрихчення. Використання лазерного нагріву при боруванні забезпечує формування нового шару зі спеціальними властивостями. Однак оптимальних властивостей можна досягти лише після встановлення взаємозв'язку між параметрами ведення процесу та глибиною борованого шару. Метою роботи було визначення впливу параметрів лазерного нагрівання на структуру та глибину борованого шару, оскільки від глибини останнього залежать властивості поршневих кілець. Проведені дослідження показали, що збільшення швидкості переміщення деталі в процесі лазерного нагрівання зменшує глибину боратованого шару. Така залежність спостерігається як при товщині покриття 0,15 мм, так і при товщині 0,30 мм. Для всіх режимів швидкості переміщення заготовки для використовуваної борвмісної оболонки з вищевказаною товщиною більшій товщині борованого шару та площі термічного впливу відповідає більша товщина покриття. Збільшення розміру плями призводить до збільшення глибини шару. Методами рентгенівської та металографічної дифракції були розшифровані фази та структурні складові борованого шару. Рентгенівська дифракція та мікроструктурний аналіз виявили зв'язок між швидкістю експозиції та часткою структур з високим вмістом бору в шарі. Показано, що боратований шар у ковкому чавуні складається з таких фаз, як FeB , Fe_2B , α -фаза та бороцементит $Fe_3(B, C)$. Результати досліджень можуть бути поширені на інші деталі, що піддаються інтенсивному зношуванню.

Ключові слова: детонаційне покриття, поверхня, фрактал, міцність, гідромолот, математична модель.

Introduction

One way to improve the performance properties of cast iron piston rings, exposed to abrasion, is boriding. However, the use of traditional boriding methods associated with diffusion of boron into a solid phase lead to the formation of a working layer having high brittleness. Therefore, the actual problem is the development of a different method of surface hardening, not leading to embrittlement. Implementation of such a process can be carried out using laser heating accompanied by surface layer melting. However, this method can be offered to be used in the production only after a detailed study of the relationship between the parameters of process implementation and the depth of the layer, as well as after studying the peculiarities of structure formation under specific conditions of laser boriding. The properties of the product on which a borated layer is applied depend on the depth of the latter.

Analysis of publications shows that the technique of increasing the wear resistance of piston rings by boriding, conducted using non-traditional methods, but using the latest technologies has not been developed so far. In sources [1-3] they proposed to increase durability by either traditional borating, or laser treatment. However, there is no association of these two technological processes.

Implementation of such a process can be carried out by establishing the interrelation between the parameters of laser heating and the depth of the borated layer.

The objective of this work was to determine the influence of laser action parameters into the depth of the borated layer and revealing the features of structure formation of such layers.

Research materials and methods

The research material applied was ductile iron containing C = 3,47 %, Si = 2,15 %, Mn = 1.36 %. After pretreatment, it had a ferrite-perlite structure (85-90 % perlite). The size of nodule corresponds to 3 points.

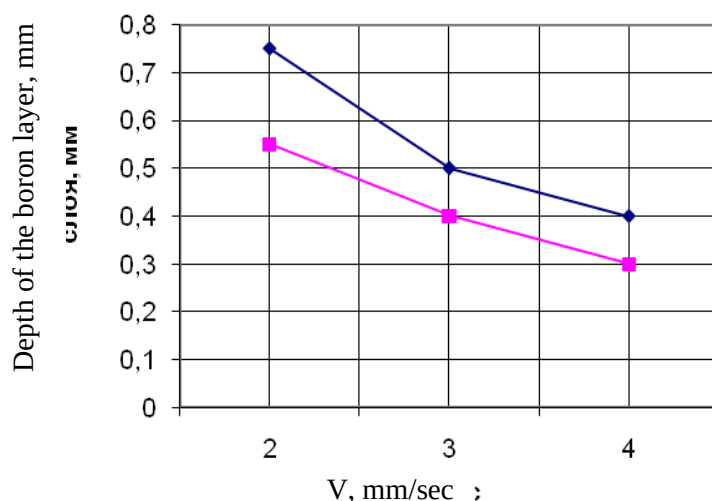
Laser treatment was carried out using the continuous CO₂ laser. At a constant irradiation power, they varied the speed of movement of the sample in the range of 2-4 mm/sec. The thickness of coating boron was 0.15 mm and 0.30 mm. Conditional defocusing (F_{cond}) allowed to change the irradiation spot diameter from 2 to 4 mm. A mixture of amorphous boron with acetone and zapon varnish was used as a coating material.

The structure, phase composition, the depth of the borated layer was studied by optical microscopy, using conventional and staining etching as well as X-ray structural analysis.

Research results and their discussion

With the help of etching by a 4 % nitric acid solution, revealing the entire layer structure, it was established that the change in the metal structure as a result of doping occurs only in the melting zone. Study of the profile of the reflow zone boundary indicates that a deeper penetration of the metal matrix occurs near the graphite inclusions that confers the border in waves.

Figure 1 shows the dependence of the depth of the borated layer on the speed of workpiece displacement for two cases – with a coating thickness of 0.15 and 0.30 mm (curve 1 and 2 respectively).



1 – 0.3 mm thickness of coating; 2 – 0.15 mm thickness of coating

Figure 1 – Dependence of the depth of the borated layer on the rate of workpiece displacement

The graph shows that with an increase in the velocity of sample movement the depth of the borated layer decreases. Such dependence is observed both at 0.15 mm thickness of coating and at a thickness of 0.30 mm. Over a full range of speeds of workpiece movement for the applied boron

containing coating with the specified thickness a greater thickness of the borated layer and HAZ corresponds to greater thickness of coating.

Figure 2 shows a histogram of the depth of the borated layer with a thickness of 0.3 mm and the workpiece velocity of 2 mm/s for the spot diameter 2 and 4 mm, and Figure 3 presents the same histogram in case of specimen velocity of 4 mm/sec.

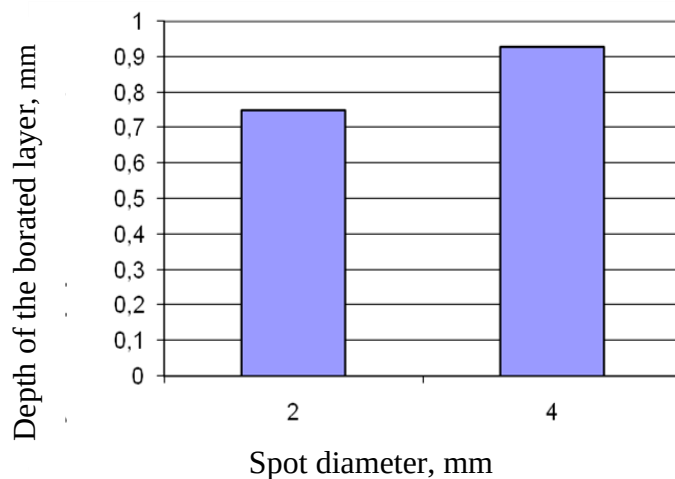


Figure 2 – Histogram of the borated layer depth with a thickness of 0.3 mm and specimen velocity of 2 mm/s for different diameter of the spot

Figure 3 Histogram of the depth of the borated layer with a thickness of 0.3 mm and specimen velocity of 4 mm/sec for different spot diameter.

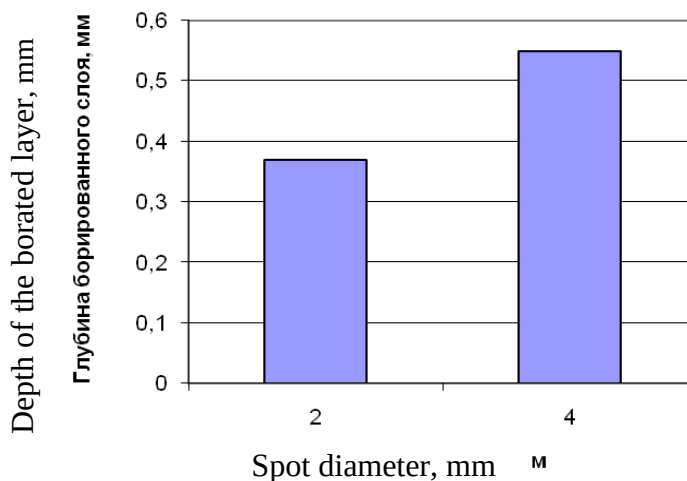


Figure 3

The above histograms show that the variation of defocusing conditions, the consequence of which is the change of the spot diameter irradiation, results in a noticeable change in the depth of the layer of laser doping. Thus, reducing the defocus, ceteris paribus, the result of which there is a decrease in spot diameter, it causes a decrease in the depth of laser irradiation.

It can be assumed that the resulting effect is due to a significant increase in the surface temperature resulting in intense evaporation of the coating layer, increasing the energy costs for evaporation.

X-ray analysis showed that the borated layer in the ductile iron contains such phases as FeB, Fe₂B, α -phase, borocementite Fe₃ (B, C).

A comparison of microscopic and X-ray analysis with diagrams of state Fe-B and Fe-Fe₂B-Fe₃C revealed that these phases at crystallization of melt can form throughout the volume of the molten layer various structural components: a mixture of peritectic type (FeB + Fe₂B), hypereutectic, eutectic and hypoeutectic structures.

Differentiation of phases in various structures is carried out by the method of colouring etching; by the analysis of primary crystals forms.

Excess α -phase is formed from γ -phase primary crystals according to the martensitic mechanism. Borocementite Fe₃ (B, C) and borides FeB, Fe₂B differ by metallography – by excess crystals form and the behaviour during staining etching.

Primary borocementite crystals present plate-clustering – flat dendrites, which in cross sections are perpendicular to the surface, are detected in the form of thin strips.

In accordance with the ternary diagram borocementite can be formed not only by direct crystallization from a liquid solution, but also as a result of peritectic transformation [2].

Structurally-free crystals of borides Fe₂B are observed in the form of rodlet crystals having in the cross-section the shape of squares, rhombus, triangles, i.e., of all possible cross-sections of the tetragonal prism.

Eutectic components of structures in the borated layer are characterized by a definite structure diversity and dispersion.

The eutectic point in different layers and within the same layer is different by both different dispersion ability and various quantitative relation between the phases.

Comparing the patterns of layers with the comparable depth illustrates the effect of coating depth on the structure. For example, a three-zone layer with predominance of eutectic and hypoeutectic structures can become dual-zone with hypereutectic and eutectic zones with a predominance of the first one when changing the thickness of coating from 0.3 to 0.15 mm.

With increasing the exposure rate, under otherwise equal conditions of treatment there is a decrease in the depth of the layer, i.e., the volume of the molten metal bath decreases and consequently – the amount of boron dissolved in it increases therein. The data of X-ray diffraction and microscopic analysis reveal a change in the layer composition. X-ray diffraction shows an increase in the intensity of borocementite lines with the growth of irradiation rate, and microstructurally it is revealed by an increase in the share of structures with a high content of boron.

Conclusions

1. It was established that when conducting laser boriding with an increase in RMS-velocity of sample movement the depth of the borated layer decreases.
2. The histograms of the borated layer indicate the increase of the latter with an increase of the irradiation spot diameter from 2 to 4 mm.
3. X-ray and metallographic diffraction detected the phases and structural composition of the borated layer.
4. The effect of coating thickness on the structure is established.
5. X-ray and microstructural diffraction analysis revealed a connection between the RMS-irradiation growth and the share of high-boron structures in the layer.

6. The results of the research can be recommended for implementation in production of both piston rings and other parts made of ductile iron subjected to wear during operation.

References

1. Microstructure and Properties of Cladding Layers Prepared by Argon-Shielded Arc Cladding of CuZn40-WC Powders on Pure Aluminum Substrate / X. Zhang et al. *Coatings*. 2018. Vol. 8, no. 11. P. 382. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings8110382>.
2. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review / N. Catalán et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 562. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040562>.
3. Effect of Post-Aging on Laser-Boronized Surface of 18Ni-300 Maraging Steel with Hypoeutectic Structure / J. Škamat et al. *Lubricants*. 2025. Vol. 13, no. 6. P. 236. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants13060236>.
4. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review / N. Catalán et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 562. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040562>.
5. Paczkowska M. Evaluation of the influence of the laser alloying with cr, b and ni of grey iron parts on their wear resistance. *Technical Sciences*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.31648/ts.10064>.

MECHANISMS OF STRENGTHENING OF HIGH-SPEED STEELS IN THE PROCESS OF ION-PLASMA NITRIDING ⁵

Bohdan SEREDA, student of group I-22/2mt,
Denys LOPARYEV, student of group I-22/2mt-3,
Tatiana HOVORUN, Associate Professor, **Khrystyna BERLADIR**, Associate Professor
Sumy State University

Abstract. *The mechanisms of surface hardening of two types of high-speed steels AISI M2 and M41 during ion-plasma nitriding were analysed. The structural-phase composition of the modified layers was studied depending on the conditions of their production, and the functional properties after treatment were determined. After ion-plasma nitriding, the microhardness of the surface layer of steels AISI M2 and M41 increases to 10-12 GPa, depending on the structural-phase state. The results obtained showed high resistance of the coatings to friction and wear, which makes them effective in critical operating conditions.*

Keywords: *high-speed steel, ion-plasma nitriding, microstructure, microhardness, wear resistance.*

МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ У ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ

Богдан СЕРЕДА, здобувач вищої освіти групи І-22/2мт,
Денис ЛОПАРЄВ, здобувач вищої освіти групи І-22/2мт-3,
Тетяна ГОВОРУН, доцент, **Христина БЕРЛАДІР**, доцент
Сумський державний університет

Анотація. *Проаналізовано механізми зміцнення поверхні двох типів швидкорізальних сталей AISI M2 та M41 під час іонно-плазмового азотування. Вивчено структурно-фазовий склад модифікованих шарів залежно від умов їх отримання та визначено функціональні властивості після обробки. Після іонно-плазмового азотування мікротвердість поверхневого шару сталей AISI M2 та M41 зростає до 10-12 ГПа, залежно від структурно-фазового стану. Отримані результати показали високу стійкість покриттів до тертя та зносу, що роблять їх ефективними у відповідальних умовах експлуатації.*

Ключові слова: *швидкорізальна сталь, іонно-плазмове азотування, мікроструктура, мікротвердість, зносостійкість.*

⁵ The work was carried out under the supervision of Associate Professor Tatiana HOVORUN, Associate Professor Khrystyna BERLADIR

Introduction

Steels AISI M2 and M41 are among the most common high-speed steels, widely used in the production of cutting tools for processing various materials, including steels, alloys, non-ferrous metals, cast iron, wood, and composites. The high content of alloying elements such as W, Cr, Mo, Co, and Va provides their unique properties through the formation of carbides. Each of these elements affects key characteristics of steel, including hardness, wear resistance, and heat resistance [1].

Publication analysis

To work effectively, a cutting tool must have properties such as hardness, wear resistance, strength, thermal conductivity, heat resistance, and heat capacity, as well as favourable adhesion and friction characteristics. In particular, high-speed steels AISI M2 and M41 are distinguished by their strength, hardness, wear resistance, and heat resistance, which makes them suitable for processing various materials in various industries [2].

Ion-plasma nitriding is a chemical-thermal treatment method used for processing machine parts, tools, and stamping equipment. This process ensures diffusion saturation of the surface layer of steel with nitrogen in a nitrogen-hydrogen plasma at a temperature of 400-600°C. Publications in recent years indicate that nitriding in glow discharge plasma is one of the most effective surface modification methods, which is widely used in industrialized countries. The successful application of ion plasma nitriding in industries such as automotive, aerospace, medical, and tool manufacturing confirms its importance in ensuring high quality, reliability, durability, and long service life of metal products. As practice shows, ion nitriding is used for mechanical engineering parts, the main cause of destruction of which is wear of the material surface. The study of the mechanisms of formation of thin modified layers on steels using ion-plasma nitriding is of great practical importance for solving problems with wear, corrosion and other aspects of the operation of steel structures, especially in aggressive environments [1-2].

Purpose and setting of the task

The purpose of the research is to study the features of phase and structure formation of high-speed tool steels AISI M2 and M41 during ion-plasma nitriding to determine the optimal surface treatment modes, which contributes to increasing the durability of tools. Research objectives – to study the processes of formation of modified layers on steels AISI M2 and M41 during ion-plasma nitriding; to analyse structural and phase transformations on steels AISI M2 and M41 during ion-plasma nitriding; to assess the influence of the structural and phase state of modified layers on the mechanical and tribological properties of steels AISI M2 and M41.

Research materials and methods

The study of the influence of ion-plasma nitriding processes on the structure and properties of tool high-speed steels AISI M2 and M41 was carried out after standard heat treatment. It included isothermal annealing at temperatures of 840-870°C, cooling to 740-750°C in a furnace with a holding time of at least 1-1.5 hours, further cooling to 600°C in a furnace and in air, hardening with heating at temperatures of 1200-1230°C with subsequent cooling in oil, double tempering at temperatures of

540-560°C with subsequent cooling in air. Ion-flame nitriding was performed in the NGV-6.6/711 installation. The study uses the following methods of structural analysis, in particular metallographic analysis, X-ray diffraction and X-ray structural analysis, surface microscopy, microhardness measurements, and mechanical and tribological properties of the obtained layers.

Research results and their discussion

The microhardness of the nitrided layer in AISI M2 steel reached a peak value of 10.5-11.5 GPa, and then returned to the initial hardness of the steel. This increased microhardness in the surface layer is attributed to the formation of nitrogen-rich martensite and dispersed nitrides (in particular, ϵ and γ' phases), as well as the presence of hard nitrides and carbonitrides from alloying elements such as Mo, W, Cr, and V. The structure of the nitrided surface layer containing these components increased wear resistance and improved the performance properties of AISI M2 steel. With increasing nitriding time, the depth of the nitrided layer increases, which is consistent with the findings of other researchers [3]. The transition from the nitrided layer to the base (matrix) of the material is gradual, which is a key requirement for the microstructure of nitrided steel and is consistent with the results of additional studies [4].

The ideal microstructure of nitrided high-speed steel AISI M41 consists of nitrogen-rich martensite, which does not contain excess nitrides. This specific microstructure was achieved by saturating the surface of tools made of AISI M41 steel with nitrogen at a temperature of 480-520°C during a short-term nitriding process lasting up to one hour. As a result, a hardened layer with a depth of 20-40 microns was formed, which had a surface microhardness of 10-12 GPa and a core hardness of 8-9 GPa. Additionally, tool life after ion nitriding improves by 2-8 times, depending on the type of tool and the material being machined.

The main advantage of ion nitriding of AISI M41 steel is the possibility of obtaining a diffusion-hardened layer or a layer with monophase Fe_4N nitride (γ' -phase) on the surface. This differs from classical gas nitriding in ammonia, where the nitride layer consists of two phases – $\gamma' + \epsilon$, which can lead to the appearance of internal stresses at the phase boundary and reduce the stability of the hardened layer due to its fragility and delamination during operation.

Conclusions

Analysis of the obtained results showed that the composition of alloying elements also changes during nitriding, which indicates a complex mechanism of nitrogen interaction with the surface of AISI M2 and M41 steels and contributes to the formation of stable nitride phases. The wear resistance of a tool made of nitrided high-speed steel during cutting depends on the amount of carbide phase in the steel and increases with increasing its concentration. To ensure the high wear resistance of a high-speed steel tool, it is important not only to eliminate excess phases but also to form nitrogen-containing martensite during short-term saturation with maximum nitrogen saturation. This allows for high plastic properties and the presence of compressive stresses, which contribute to increased wear resistance.

Controlling the duration and conditions of nitriding is important for achieving optimal properties of AISI M2 and M41 steel. The results confirmed that ion plasma nitriding is an effective method for improving the properties of high-speed steels to increase their strength and wear resistance.

References

1. Залога, В.О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні [Текст]: навч. посіб. / В.О. Залога, В.Д. Гончаров, О.О. Залога. – Суми: СумДУ, 2013. 371 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30562>.
2. Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels / K. Berladir et al. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 21. P. 6877. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216877>.
3. Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V. Increasing the service life of gears based on the choice of technologies for strengthening the working surfaces of teeth. *Bulletin of scientific and technical development*, Poland, 2019. pp. 11–22.
4. Guo J.-Y., Kuo Y.-L., Wang H.-P. A Facile Nitriding Approach for Improved Impact Wear of Martensitic Cold-Work Steel Using H₂/N₂ Mixture Gas in an AC Pulsed Atmospheric Plasma Jet. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 9. P. 1119. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11091119>.

АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ⁶

Денис КОЛОБОВ, здобувач здобувач вищої освіти групи МС-21-23,
Ілля МИКИТАН, здобувач вищої освіти групи МС-41-21,
Владислава БАЙДАЛА, асистент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена дослідженню застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для аналізу мікроструктури матеріалів з метою покращення їх властивостей та оптимізації процесів обробки. Розглянуто можливості використання алгоритмів машинного навчання та комп'ютерного зору для автоматизації аналізу зображень мікроструктури, виявлення закономірностей та прогнозування властивостей матеріалів. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку ШІ в матеріалознавстві, а також виклики та перспективи для науковців у цій галузі.

Ключові слова: штучний інтелект, матеріалознавство, мікроструктура, машинне навчання, комп'ютерний зір, аналіз зображень, властивості матеріалів, оптимізація процесів.

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF MATERIALS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE: NEW OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

Denys KOLOBOV, student of group MC-21-23,
Illia MYKYTAN, student of group MC-41-21,
Vladyslava BAIDALA, assistant
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The article is devoted to the study of the application of artificial intelligence (AI) methods for analysing the microstructure of materials in order to improve their properties and optimise processing processes. The article considers the possibilities of using machine learning and computer vision algorithms to automate the analysis of microstructure images, identify patterns and predict material properties. The current trends in the development of AI in materials science, as well as challenges and prospects for scientists in this field are analysed.

Keywords: artificial intelligence, materials science, microstructure, machine learning, computer vision, image analysis, material properties, process optimisation.

Вступ

У сучасному світі, де технології розвиваються з неймовірною швидкістю, ШІ стає невід'ємною частиною багатьох галузей науки та промисловості. Матеріалознавство, як наука

⁶ Робота виконана під керівництвом асистента Владислави БАЙДАЛИ

про зв'язок між складом, структурою та властивостями матеріалів, не є винятком. Аналіз мікроструктури матеріалів є ключовим етапом у дослідженні та розробці нових матеріалів з покращеними властивостями. Однак, традиційні методи аналізу мікроструктури, такі як оптична та електронна мікроскопія, часто є трудомісткими та потребують значних часових витрат.

У зв'язку з цим, застосування методів ШІ для аналізу мікроструктури матеріалів відкриває нові можливості для автоматизації та покращення цього процесу. Алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору дозволяють автоматично виявляти закономірності, класифікувати мікроструктури та прогнозувати властивості матеріалів на основі їх мікроструктури. Це не тільки прискорює процес аналізу, але й дозволяє виявити зв'язки, які важко виявити традиційними методами.

Аналіз публікацій

Аналіз існуючих джерел демонструє зростаючу роль ШІ в матеріалознавстві. У роботах [1] підкреслюється активне обговорення та дослідження застосування ШІ в науці та освіті. У роботі [2] показано потенціал ШІ для виявлення нових законів природи, що має пряме застосування в матеріалознавстві для аналізу та прогнозування властивостей матеріалів. У роботі [3] підкреслено, як ШІ оптимізує 3D-друк, важливий для створення нових матеріалів. Автори роботи [4] повідомляють про відкриття мільйонів нових матеріалів за допомогою глибокого навчання, демонструючи потужність ШІ в пошуку та аналізі матеріалів. Стаття [5] описує масштабування глибокого навчання для відкриття матеріалів, а стаття [6] представляє автономну лабораторію для прискореного синтезу нових матеріалів. Отже, ШІ активно впроваджується в матеріалознавство, від аналізу до синтезу нових матеріалів.

Мета та завдання роботи

Метою роботи є дослідження можливостей застосування методів ШІ для аналізу мікроструктури матеріалів та оцінити перспективи їх використання для покращення процесів матеріалознавства.

Завдання роботи:

- дослідити застосування методів ШІ для аналізу мікроструктури матеріалів;
- оцінити можливості використання ШІ для прогнозування властивостей матеріалів та оптимізації процесів їх обробки;
- визначити перспективи розвитку та викликів, пов'язаних з впровадженням ШІ в матеріалознавство.

Результати дослідження

Штучний інтелект (ШІ) відкриває нові можливості для аналізу мікроструктури матеріалів, дозволяючи автоматизувати та покращити цей процес. Алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору дозволяють автоматично виявляти закономірності, класифікувати мікроструктури та прогнозувати властивості матеріалів на основі їх мікроструктури. Це не тільки прискорює процес аналізу, але й дозволяє виявити зв'язки, які важко виявити традиційними методами.

Застосування ШІ для аналізу мікроструктури матеріалів включає в себе використання алгоритмів машинного навчання для аналізу зображень мікроструктури, нейронних мереж для виявлення закономірностей і класифікації, а також комп'ютерного зору для автоматизації процесу аналізу. ШІ також може бути використаний для прогнозування властивостей матеріалів на основі їх мікроструктури. Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для прогнозування механічних, термічних та інших властивостей матеріалів. Крім того, ШІ може бути використаний для оптимізації процесів обробки матеріалів, таких як зварювання, термообробка та механічна обробка. Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для оптимізації параметрів процесів обробки та прогнозування якості обробки.

Переваги та недоліки використання ШІ в матеріалознавстві. Використання ШІ в матеріалознавстві має ряд переваг:

- дозволяє автоматизувати рутинні та трудомісткі процеси, такі як аналіз зображень мікроструктури. Замість того, щоб вручну аналізувати сотні зображень, алгоритми ШІ можуть автоматично виявляти та класифікувати різні мікроструктурні елементи.

- може обробляти великі обсяги даних значно швидше, ніж людина. Алгоритми машинного навчання можуть швидко аналізувати дані, отримані з різних джерел, таких як електронна мікроскопія, рентгенівська дифракція та механічні випробування, для прогнозування властивостей матеріалів.

- може забезпечити високу точність аналізу та прогнозування. Нейронні мережі можуть виявляти тонкі закономірності в даних, які важко виявити традиційними методами, що дозволяє отримувати більш точні прогнози властивостей матеріалів.

- здатний оптимізувати виробничі процеси. Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для оптимізації параметрів зварювання, термообробки або 3D-друку, що дозволяє покращити якість продукції та зменшити відходи.

- допомагає у відкритті нових матеріалів з необхідними властивостями. За допомогою ШІ Google DeepMind було знайдено 2,2 млн нових матеріалів.

Однак, існують і недоліки, такі як необхідність великих обсягів даних та складність інтерпретації результатів:

- для навчання алгоритмів ШІ потрібні великі обсяги якісних даних. Наприклад, для навчання нейронної мережі для аналізу зображень мікроструктури потрібно багато зображень з розміткою.

- результати, отримані за допомогою алгоритмів ШІ, можуть бути складними для інтерпретації. Нейронні мережі можуть виявляти складні закономірності в даних, які важко пояснити.

- використання ШІ в матеріалознавстві може викликати етичні питання, пов'язані з відповідальністю за прийняті рішення та можливими наслідками використання нових матеріалів.

- якість результатів, отриманих за допомогою ШІ, безпосередньо залежить від якості даних, на яких навчався алгоритм. Помилкові або неповні дані можуть призвести до неточних прогнозів.

- для розробки та застосування алгоритмів ШІ в матеріалознавстві потрібні висококваліфіковані фахівці, які володіють знаннями в галузі ШІ та матеріалознавства.

Перспективи розвитку та виклики для науковців. Галузь матеріалознавства переживає трансформацію завдяки стрімкому розвитку ШІ. Перспективи для науковців у цій

галузі надзвичайно широкі та багатогранні. Науковці можуть брати участь у розробці нових алгоритмів машинного навчання, спеціально адаптованих для аналізу мікроструктури матеріалів. Розробка алгоритмів, здатних автоматично виявляти та класифікувати дефекти в матеріалах, або алгоритмів, що можуть прогнозувати механічні властивості матеріалів на основі їх мікроструктури. ШІ може бути інтегрований з іншими передовими технологіями, такими як 3D-друк, для створення нових матеріалів з унікальними властивостями. Використання алгоритмів ШІ для оптимізації параметрів 3D-друку, що дозволяє створювати матеріали з заданими мікроструктурними характеристиками. ШІ може допомогти в пошуку та відкритті нових матеріалів з унікальними властивостями, які можуть бути використані в різних галузях, від аерокосмічної промисловості до медицини. Використання алгоритмів глибокого навчання для аналізу великих баз даних матеріалів і виявлення нових потенційних кандидатів для створення матеріалів з заданими характеристиками. ШІ може бути використаний для автоматизації експериментальних досліджень, що дозволяє прискорити процес розробки нових матеріалів. Створення автономних лабораторій, де роботизовані системи, керовані алгоритмами ШІ, проводять експерименти з синтезу та аналізу нових матеріалів.

Попри великі перспективи, молоді науковці стикаються з певними викликами в цій галузі. Для успішної роботи в цій галузі необхідно володіти знаннями як в галузі ШІ, так і в галузі матеріалознавства. Це вимагає від науковців здатності до міждисциплінарного навчання та співпраці з фахівцями з різних галузей. Навчання алгоритмів ШІ вимагає великих обсягів якісних даних, що можуть бути важкодоступними. Використання ШІ в матеріалознавстві може викликати етичні питання, пов'язані з відповідальністю за прийняті рішення та можливими наслідками використання нових матеріалів. Галузь ШІ постійно розвивається, що вимагає від науковців постійного навчання та адаптації до нових технологій. Необхідно постійно слідкувати за новими дослідженнями, розробками та інноваціями, що впроваджуються в галузі.

Отже, науковці, які готові до міждисциплінарної роботи, постійного навчання та врахування етичних аспектів, мають великі можливості для успішної діяльності в галузі застосування ШІ в матеріалознавстві.

Висновки

Штучний інтелект (ШІ) відкриває нові можливості для аналізу мікроструктури матеріалів, дозволяючи автоматизувати та покращити цей процес. Застосування ШІ в матеріалознавстві має ряд переваг, таких як автоматизація, швидкість і точність аналізу. Однак, існують і недоліки, такі як необхідність великих обсягів даних та складність інтерпретації результатів. Перспективи розвитку ШІ в матеріалознавстві є великими, але існують і виклики для науковців у цій галузі.

Список використаних джерел

1. *Штучний інтелект у науці та освіті (AISE 2024)* : матеріали міжнародної наукової конференції, м. Київ, 1-2 березня 2024 р. Київ, 2024. 600 с. DOI: <https://doi.org/10.35668/978-966-479-141-7>.

2. Фізика майбутнього: як штучний інтелект допоможе розкрити нові закони природи. *ФІЗИКА.UA*. URL: <https://www.fizykaua.com/post/fizyka-maibutn'oho-iak-shtuchnyi-intelekt-dopomozhe-rozkryty-novi-zakony-prirody>.
3. AI і 3D-друк: як AI впливає на 3D-друк. *SUNG. Mould & Plastic*. URL: <https://sungplastic.com/uk/how-ai-affects-3d-printing/>.
4. Аміл Мерчант, Екін Догус Кубук. Мільйони нових матеріалів, відкритих за допомогою глибокого навчання. *Google DeepMind*. URL: <https://deepmind.google/discover/blog/millions-of-new-materials-discovered-with-deep-learning/>.
5. Scaling deep learning for materials discovery / A. Merchant et al. *Nature*. 2023. No. 624. P. 80–85. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06735-9>.
6. An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials / N. J. Szymanski et al. *Nature*. 2023. No. 624. P. 86–91. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06734-w>.

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ⁷

Ігор ПАСТУШКО, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Павло ЗЛОБІН, здобувач вищої освіти групи МС-51-24
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі досліджено вплив структури та фазового складу економнолегованих метастабільних і вториннотвердіючих сталей на їх зносостійкість для застосування в інструменті гарячої обробки металу. Проведено випробування на зношування різних сталей за різних температур і навантажень. Виявлено утворення «білої смуги» в контактній зоні наплавленого металу, що характеризується високою мікротвердістю. Встановлено, що утворення «білої смуги» залежить від хімічного складу сталі та умов тертя. Показано, що легування сталей елементами-аустенізаторами (Mn, C, Ni) та карбідоутворювачами (V, Mo) впливає на утворення та властивості «білої смуги», а отже, і на зносостійкість.

Ключові слова: зносостійкість, наплавлення, гаряча обробка металу, структура, фазовий склад, «біла смуга», тертя, температура, навантаження.

INFLUENCE OF STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION ON WEAR RESISTANCE OF ECONOMICALLY ALLOYED ALLOYS

Ihor PASTUSHKO, postgraduate student,
Pavlo ZLOBIN, student of the group MC-51-24
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The paper investigates the influence of the structure and phase composition of economically alloyed metastable and secondary hardening steels on their wear resistance for use in hot metalworking tools. Wear tests were carried out on various steels at different temperatures and loads. The formation of a «white band» in the contact zone of the deposited metal, characterised by high microhardness, was detected. It was found that the formation of the «white band» depends on the chemical composition of the steel and friction conditions. It is shown that alloying steels with austenitizing elements (Mn, C, Ni) and carbide forming elements (V, Mo) affects the formation and properties of the «white band», and hence the wear resistance.

Keywords: wear resistance, surfacing, hot metal working, structure, phase composition, «white band», friction, temperature, load.

⁷ Робота виконана під керівництвом професора Діани ГЛУШКОВОЇ

Вступ

Застосування прогресивних технологічних операцій дозволяє задавати бажану структуру та властивості досліджуваних матеріалів шляхом їх наномодифікування [1], підвищувати корозійну стійкість зварних з'єднань і керувати структурою та властивостями порошкових газоплазових покриттів [2], підвищувати корозійну стійкість жароміцних сплавів для деталей енергетичного обладнання [3]. При цьому застосування математичного апарату дозволяє оптимізувати режими обробки виробів підвищеної відповідальності, що позитивно впливає на їх службові характеристики [4].

Дослідження, спрямовані на розробку вдосконалення економнолегованих сталевих зносостійких сталей для наплавлення інструменту гарячої обробки металу, дуже актуальні.

Інструмент гарячої обробки металу призначений для виконання основної операції – пластичної деформації металу за високих температур. Для високопродуктивної роботи цей інструмент повинен володіти достатньою твердістю, опором стиску, вигину, динамічним навантаженням, високим опором стирання та ударно-абразивному зносу, теплостійкістю, мати добре оброблену поверхню робочих частин.

В даній роботі проведено дослідження впливу структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних і вториннотвердіючих сталей.

Матеріали та методи дослідження

Наплавлення досліджуваних матеріалів проводилася мідні форми з різною швидкістю примусового охолодження. Досліджувалися метастабільні аустенітні, мартенситно-аустенітні та вториннотвердіючі сталі системи Cr-Mn-Ti додатково леговані Mo, B, V.

Випробування на зношування проводили відповідно до вимог Держстандарту 30480-97 «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи випробування на зносостійкість. Загальні вимоги».

Для випробування використовувалася машина тертя 2070 СМТ-1, схема випробування – диск-колодка. Режим тертя: швидкість обертання диска 0,5 м/с; навантаження на зразок 25, 50 Н; матеріал контртіла – сталь 45Х, HRC 47...49.

Також досліджувався зношування наплавленого металу в умовах торцевого тертя про плоскі стрижні зі сталей Р18, 12Х18Н9Т та інших при поворотно-поступальному русі. Температура нагрівання нагріву зразків і стрижнів тертя замірялася хромель-алюмелевими термопарами діаметром 0,2 мм на приладі при швидкості протягу стрічки 2160 мм/хв.

Обробка результатів проводилася з урахуванням за виразами для пружно-пластичного та пластичного контактів:

Контурний тиск

$$P_c = \frac{5,4}{E^4} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{\Delta^2} \quad (1)$$

$$P_c \geq 1,45 \frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4} \quad (2)$$

Зближення

$$\varepsilon = 0,125 \left(8 \frac{P_c}{HB} + 1 \right) \quad (3)$$

У зв'язку з істотним впливом нагріву на локальну зміну форми контактуючих поверхонь тіл і структурні перетворення використовувався термоконтактний критерій для осесиметричного контакту [6]:

$$\frac{\pi}{4A} \cdot \frac{f[(1+\nu_1) \cdot \alpha_1 + (1+\nu_2) \cdot \alpha_2]}{\lambda + \lambda_{21}} \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \omega R_{\text{пр.}}^2 \cdot \sigma_{\text{н}}^2 \quad (4)$$

де f – коефіцієнт тертя;

A – механічний еквівалент теплоти;

ν_1, ν_2 – коефіцієнти Пуассона;

α_1, α_2 – термічні коефіцієнти лінійного розширення;

λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності;

E_1, E_2 – модулі пружності матеріалів;

$\sigma_{\text{н}}$ – максимальний тиск за Герцем;

ω – відносна кутова швидкість;

$R_{\text{пр.}}$ – наведений радіус кривизни.

Визначався як масовий, і лінійний знос.

Для зносостійких сталей із бейнітною, бейнітно-мартенситною та метастабільною аустенітною структурою основним матеріалом – еталоном приймався наплавлений метал 30X2B8Ф.

Пластичність поверхневого шару наплавленого металу та інструментальних термооброблених сталей оцінювалася за значеннями усередненого відносного подовження:

$$\delta_B = \frac{\delta_{\text{max}} + \delta_{\text{min}}}{2} \quad (5)$$

де

$$\delta_{\text{max}} = \frac{0,08(h/d - 0,13)}{0,264 - h/d - 1,08(h/d^2)} \quad (6)$$

$$\delta_{\text{min}} = \frac{0,75(h/d - 0,13)^2}{0,224 - h/d - 1,08(h/d)^2} \quad (7)$$

де h і d – відповідно глибина застосування індентору та діаметр відбитка при вимірах твердості.

Теплостійкість визначалася залежностями. Зразки нагрівалися до температур 900, 925, 950, 970 і 1000 К, витримка – 4 год. з охолодженням і вимірюванням твердості.

За характеристики термостійкості приймалося число циклів NP до руйнування зразків поперечному перерізі.

Результати дослідження та їх обговорення

Низька здатність до зміцнення інструментальних сталей і сплавів призводить до підвищення темпу зносу та передчасного переходу до стадії критичного зносу [5, 6].

Двійникування та виділення карбідів по двійниках у метастабільних аустенітних і вториннотвердіючих сталей підвищує опірність пластичним зсувам при підвищених температурах, ускладнюючи руйнування робочих поверхонь при терті. Інтенсивність зношування деяких досліджених сталей наведено на рис. 1.

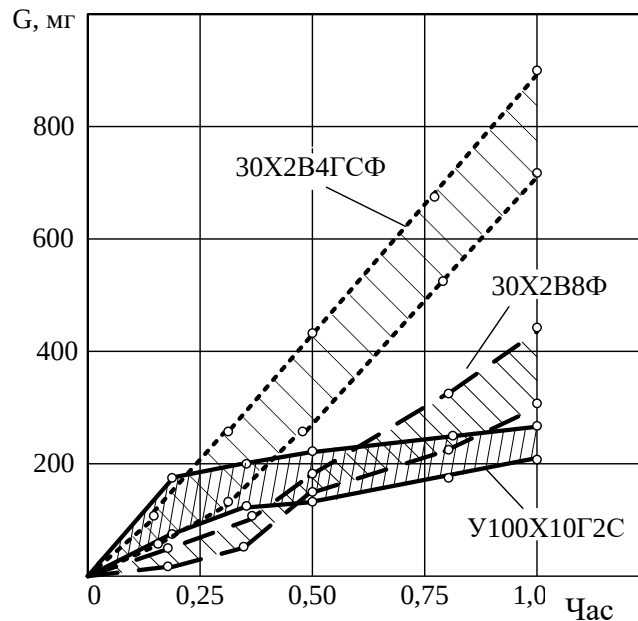


Рисунок 1 – Інтенсивність зношування наплавленого металу

Параметри режиму: ТСМ = 773 К, РА = 20 МПа, VB.П.П. = 0,188 м/с, матеріал стрижня тертя – сталь Р18. Початкова кількість аустеніту в структурі сплавів, що випробовуються: 30X2B8Ф – 5...7 %; 30X2B4ГСФ – 15 %; У100Х10Г2С – 95...97 %.

Після випробування при об'ємній температурі робочої частини зразка $T = 553...573^{\circ}\text{C}$ у контактних об'ємах наплавленого металу типу 30X2B8Ф виявлено розширення меж зерен, лінії зсуву, більш дрібне порівняно з нижчими шарами зерно. Структура, що формується у фронті зносу, подібна до структури білої зони будовою та характеризується високою мікротвердістю. Характерна зміна структури наплавленого металу в контактній зоні та нижчих шарах, що лежать, наведені на рис. 2.

Зіставлення щільності дислокацій поверхневого шару наплавленого металу з карбідним та інтерметалідним зміцненням показало, що безпосередньо біля поверхні зносу щільність дислокацій та величина мікрспотворень дещо нижча, ніж на видаленні 20-40 мкм (рис. 2).

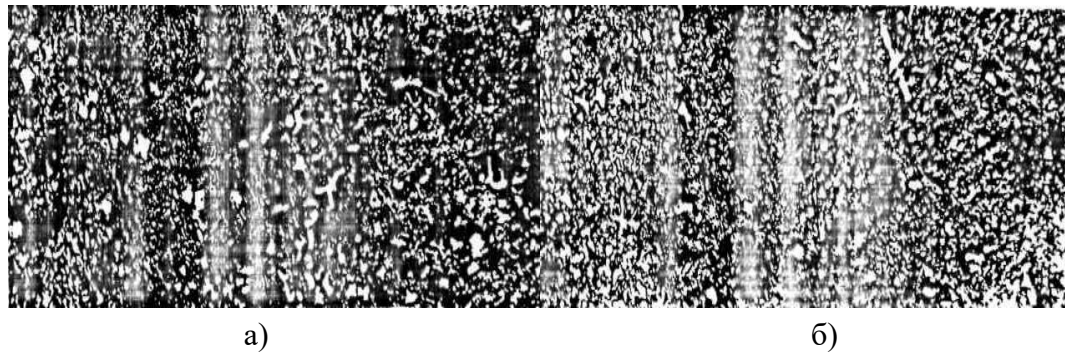
З підвищенням температури стрижня тертя до ТСТ – 823 К мікротвердість металу контактних обсягів помітно знизилася (рис. 3). Для граничного шару характерна структура «білої зони» після високої відпустки.

В окремих зразках із хромомолібденового наплавленого металу виявлено порушення суцільності за межами зерен.

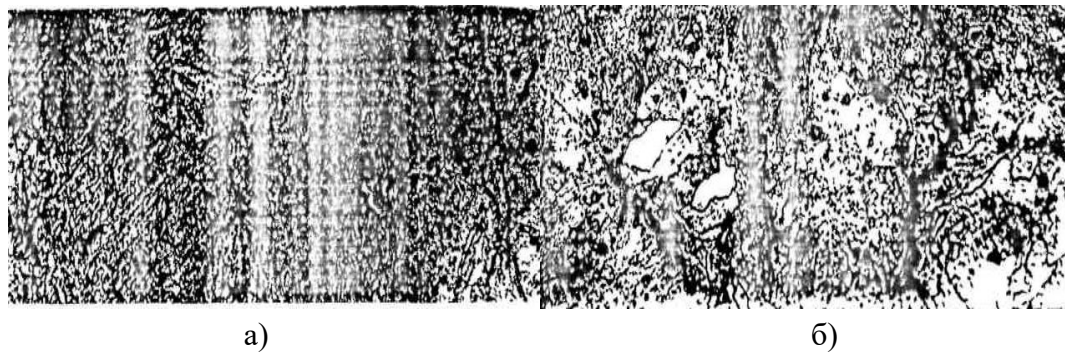
Структура відпущеного металу «білої смуги» наплавлення 50X5M2B2H1Ф змінюється у поверхні зношування продуктами відпустки з ділянками аустеніту при підвищенні температури стрижня тертя від 823 К до 973 К.

Легування наплавленого металу додатково нікелем і марганцем знижує АС1, а збільшення концентрацій хрому, вольфраму, молібдену, навпаки, підвищує зазначену

температуру, що є закономірним для термічних впливів з низьким рівнем напружень, що діють на метал.



У120Х4Т3



30Х4Ф1СТР

а – біля поверхні; б – 2 мм від зносу

Рисунок 2 – Структура наплавленого металу після випробувань на зношування

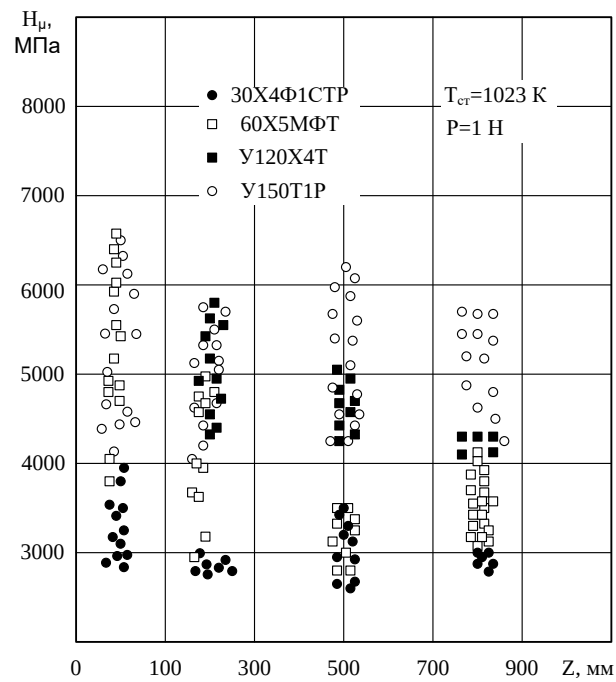


Рисунок 3 – Вплив складу наплавленого металу на мікротвердість після випробувань на зношування

При додатковому легуванні хромистого сплаву 3...4 % вольфрамом та молібденом, знижується кількість аустеніту у міру подальшого підвищення концентрації зазначених елементів. Характер їхнього впливу на температуру АС1, ймовірно, аналогічний хрому. Зниженню температури $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення сприяє зміна частки залишкового аустеніту, пов'язане зі збільшенням вмісту вуглецю, марганцю, нікелю та відповідне зменшення ефекту об'ємного перетворення. Формування ділянки «білої смуги» спостерігалось при об'ємній температурі металу зразків, що змінюється відносно широкому діапазоні (рис. 3), однак, підвищення температури стрижня тертя призвело до істотного зменшення мікротвердості та навіть до відсутності (після випробувань) зазначеної структури у фронті зносу.

Легування хромовольфрамowego наплавленого шару 4-5 % нікелем збільшило частку залишкового аустеніту, знизилася температура АС1, проте подібна з «білою смугою» структура після зношування не зафіксована, хоча максимальні значення мікротвердості приблизно такі ж, як у сплаву 30X2B8Ф. Висока мікротвердість металу контактного шару та відсутність структури «білій смуги» характерні і для наплавних сталей систем С-Сг-Мп-Ті {при $Mn \leq 2...3 \%$, $Cr \leq 6...7 \%$, $Ti = 0,8...3,0 \%$ } які піддавалися зносу за умов тертя зі стрижнями з температурою $\sim 823...1023^\circ C$.

Таким чином, результати проведених експериментів та літературні дані підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів – аустенізаторів (Мп, С, Ні), так і при легуванні карбідоутворюючими елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Мо). Виникнення зазначеної структури при зносі сталей, що містять 8...10 % W, спостерігалось для широкого інтервалу фактичних тисків та об'ємних температур. Зменшення концентрації вольфраму полегшує запобігання утворенню «білої смуги».

Вплив «білої смуги» на зносостійкість можна пов'язувати зі структурними змінами в процесі її формування, температурним і часовим інтервалами, напруженнями, що діють на неї.

Утворення «білої смуги» внаслідок диспергування та деформаційного зміцнення мартенситу або утворення бейнітно-мартенситної матриці при температурах нижче за температуру зворотного мартенситного перетворення АН обумовлює низький рівень запасу пластичності металу контактного шару.

Висновки

Проведені дослідження підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів – аустенізаторів (Мп, С, Ні), так і при легуванні карбідоутворюючими елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Мо).

Список використаних джерел

1. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*. 2019. Vol. 26, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>.
2. STRUCTURE AND PROPERTIES OF POWDER GAS-PLASMA COATINGS BASED ON NICKEL / D. B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. P. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>.

3. INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS FOR PARTS OF POWER EQUIPMENT / V. S. Vahrusheva et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. P. 137–140. DOI <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>.

4. Trembach B, Balenko O, Davydov V, Brechko V, Trembach I, Kabatskyi O (2022) Prediction the melting characteristics of self-shielded flux cored arc welding (FCAW-S) with exothermic addition (CuO-Al). *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, pp. 01–06, DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005657>.

5. Comparison of two-body abrasive wear resistance of high chromium boron-containing Fe–C B–13wt.%Cr Ti alloy with incomplete replacement of Cr for Cu the Fe C B 4wt.%Cr 7wt.%Cu–Ti alloy / B. Trembach et al. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, no. 3/105. P. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-34-40>.

6. Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–C–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5% wt.) on its Corrosion Resistance / B. O. Trembach et al. *METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNologii*. 2022. Vol. 44, no. 4. P. 493–513. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ППД НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЧАВУННИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ⁸

Артем КРИВЕНКО, здобувач вищої освіти групи МС-31-22
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Зубчасті колеса автотракторної техніки запропоновано виготовляти з високоміцного чавуну з кулястим графітом, який характеризується високим рівнем експлуатаційних та технологічних властивостей. Чавун, легований молібденом та міддю, піддавали ізотермічному гартуванню та ультразвуковій дробоструминній обробці, що забезпечує підвищення твердості, зносостійкості та втомної міцності.*

Ключові слова: *зубчасте колесо, високоміцний чавун, ізотермічне гартування, ультразвукова дробоструминна обробка.*

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF PPD ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF CAST IRON GEAR WHEELS

Artem KRYVENKO, student of group MC-31-21
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. *Gear wheels of auto-tractor equipment are proposed to be made of high-strength cast iron with spheroidal graphite, which is characterized by a high level of operational and technological properties. Cast iron alloyed with molybdenum and copper was subjected to isothermal quenching and ultrasonic shot-blasting, which ensures the increased hardness, wear resistance and fatigue strength.*

Keywords: *gear wheel, high-strength cast iron, isothermal hardening, ultrasonic shot blasting.*

Вступ

Сучасне машинобудування країни неможливо уявити без заходів, спрямованих на підвищення надійності, конкурентоспроможності випускаємої продукції. У сучасній автотракторній техніці широко застосовують зубчасті передачі [1]. Одним із напрямків розвитку конкурентоспроможності випускаємих редукторів, коробок передач і відкритих зубчастих зачеплень є зниження їх собівартості за рахунок застосування зубчастих коліс з високоміцного чавуну з поверхневим зміцненням ППД.

⁸ Робота виконана під керівництвом доцента Наталії ЛАЛАЗАРОВОЇ

Аналіз публікацій

Зубчасті колеса працюють в умовах ударно-циклічного контактного навантаження ковзанням. Спостерігаються такі види руйнування зубчастих коліс [2]: втомний злам зуба; втомне руйнування робочих поверхонь зубів; зношування та заїдання зубів. На основі аналізу умов роботи та видів пошкоджень зубчастих коліс можна сказати, що для забезпечення надійної роботи зубчасті колеса повинні мати велику твердість і зносостійкість поверхневого шару, високу контактну витривалість, втомну міцність, а також в'язку, пластичну серцевину для того, щоб сприймати знакозмінні напруження, які діють на деталь [2].

Для забезпечення наведеного комплексу експлуатаційних властивостей необхідно підібрати оптимальну марку матеріалу і, так як руйнування починається з поверхні, вибрати метод поверхневого зміцнення зубчастого колеса.

Для виготовлення зубчастих коліс транспортної техніки використовують як низько-, так і середньовуглецеві сталі: вуглецеві 40, 45, 50, 55ПП, леговані 20Х, 35Х, 40Х, 50Х, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20ХНЗА, 20Х2Н4А, 20ХН, 40ХН, 20ХНР, 20ХНМ, 20ХН2М, 18Х2Н4МА, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 14ХГН, 19ХГН, 25ХГНМТ, 20ХМ, 15ХГНТА, 15ХГН2ТА), 25ХГНМТ, 38ХМЮА, 38Х2МЮА та ін. [4]. Низьковуглецеві сталі піддають зміцненню газовою цементацією, нітроцементацією, середньовуглецеві – азотуванням, гартуванням СВЧ, лазерною обробкою. Залежно від службового призначення зубчасті колеса виготовляють не тільки з вуглецевих і легованих сталей, але в ряді випадків – із сірого та високоміцного чавуну, пластмаси та бронзи [5].

Так як руйнування деталей починається в основному з поверхні, то широке застосування знайшли оздоблювально-зміцнювальні методи поверхневого пластичного деформування (ППД). В процесі ППД в поверхневому шарі деталі відбуваються структурні зміни, створюються залишкові напруження стиску, формуються нерівності певної форми та розмірів. Все це сприяє зміцненню виробів і збільшує їх довговічність [6].

Для поверхневого зміцнення зубчастих шестерен використовують дробоструминне зміцнення, алмазне та електроімпульсне вигладжування, ультразвукове дробоструминне зміцнення, звукова вібраційна обробка в пружному середовищі та ін. [7].

Мета роботи та завдання

Метою роботи є підвищення експлуатаційних властивостей чавунних зубчастих коліс ультразвуковим дробоструминним зміцненням.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- вивчення умов роботи зубчастих шестерен коробок передач, особливостей процесу їх зношування;
- аналіз матеріалів і методів поверхневого зміцнення зубчастих коліс;
- розробка оптимальних режимів ультразвукової дробоструминної обробки;
- дослідження впливу дробоструминної обробки на структуру та експлуатаційні властивості чавуну.

Матеріал і методи дослідження

Для проведення досліджень був вибраний високоміцний чавун хімічного складу: 3,0 % С; 2,5 % Si; 0,006 % S; 1,0 % Mn; 0,068 % P; 0,4 % Mo; 1,5 % Cu; 0,05 % Mg. Для визначення

хімічного складу чавуну використовували портативний лазерний аналізатор Laser Z200 C+. Для вимірювання мікротвердості застосовували вимірювальний комплекс на основі мікротвердоміра ПМТ-3, індентор – чотиригранна алмазна піраміда. Визначення показника міцності σ_b та пластичності δ виконували на розривній машині моделі UIT STM 50. Дослідження опору втомі виконували на випробувальній машині ARBM на згин з обертанням. Ударну в'язкість вимірювали на маятниковому копрі моделі UIT IPT-C. Для дослідження шорсткості обробленої поверхні використовували портативний вимірювач шорсткості моделі TR200. Зносостійкість визначали за схемою «ролик-колодка» на машині тертя СМЦ-2.

Результати дослідження

Зубчасті колеса виготовляють із високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ). Для отримання високого рівня фізико-механічних властивостей ВЧКГ піддають ізотермічному гартуванню за режимом: нагрів до 900°C, витримка на протязі 1,5 годин, охолодження в розплаві солей при температурі 300-350°C, витримка на протязі 2 годин. Ізотермічне гартування забезпечує формування бейнітно-аустенітно-феритної структури чавуну (рис. 1).

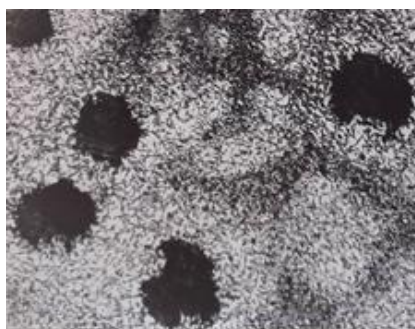


Рисунок 1 – Мікроструктура досліджуваного чавуну після ізотермічного гартування; збільшення $\times 350$

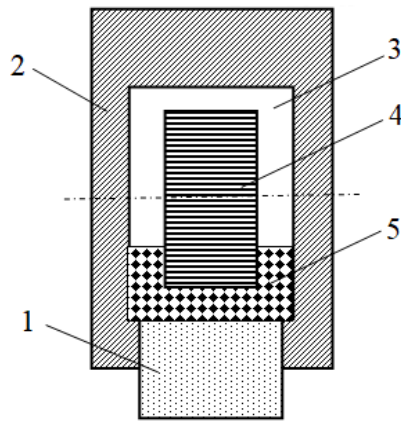
Механічні властивості високоміцного чавуну, який піддавали ізотермічним витримкам при температурі 300-350°C, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості високоміцних чавунів після ізотермічного гартування

Температура ізотермічної витримки	Твердість, HBW	Тимчасовий опір, σ_b , МПа	Пластичність, δ , %	Ударна в'язкість, КС, Дж/см ²
1. 300°C	336	1230	6	44
2. 350°C	311	1200	6	43

Температурний інтервал 300-350°C із тривалістю ізотермічної витримки 2,0 год. дозволяє отримати структуру, що забезпечує оптимальне поєднання міцності, пластичності та ударної в'язкості.

Зубчасті колеса після шліфування з метою підвищення їх працездатності піддають ППД ультразвуковим дробоструминним зміцненням за схемою, що наведена на рис. 2.



1 – хвилевід, 2 – герметична камера, 3 – зона зміцнення поверхні деталі,
4 – деталь, 5 – дріб

Рисунок 2 – Установка для ультразвукового дробоструминного зміцнення

Метод ППД має ряд переваг: зміцнення проводиться у герметичній камері, не забруднюється навколишнє середовище. Можна використовувати абсолютно сферичні кульки, які не руйнують поверхню, тому не потрібно знежирювати або очищувати деталь після зміцнення, що зменшує цикл обробки зубчастих коліс. Це – надійний, чистий, безпечний та енергозберігаючий процес ППД, який забезпечує високу якість обробленої поверхні зубчастих коліс [7].

Дробоструминна обробка складається з нескінченної кількості ударів сталевих кульок (рис. 3).



Рисунок 3 – Вигляд поверхні деталі після дробоструминної обробки

Обробку дробом проводили з різною тривалістю – 10, 20 і 30 хвилин. До і після обробки дробом вимірювали мікротвердість і шорсткість обробленої поверхні. Вихідна шорсткість – 1,25 мкм.

Результати випробувань представлені на рис. 4 і 5.

Проведені дослідження показали, що при обробці сталевим дробом на протязі 20 хв. отримана максимальна середня мікротвердість 7300 МПа та мінімальна середня шорсткість 0,8 мкм за параметром Ra . При збільшенні часу обробки до 30 хв. спостерігається збільшення шорсткості, мікротвердість зменшується, що можна пояснити перенаклепом поверхневого шару. На основі проведених випробувань було прийнято оптимальний час обробки дробом 20 хв.

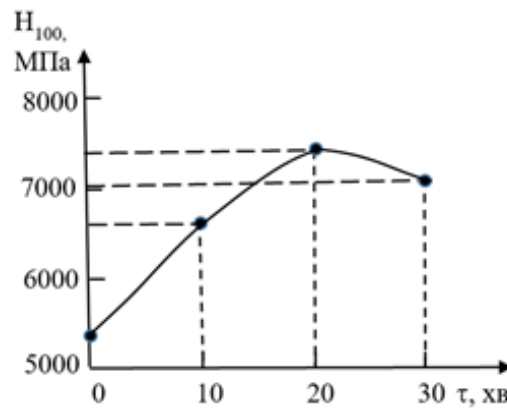


Рисунок 4 – Залежність мікротвердості поверхневого шару від часу обробки ППД

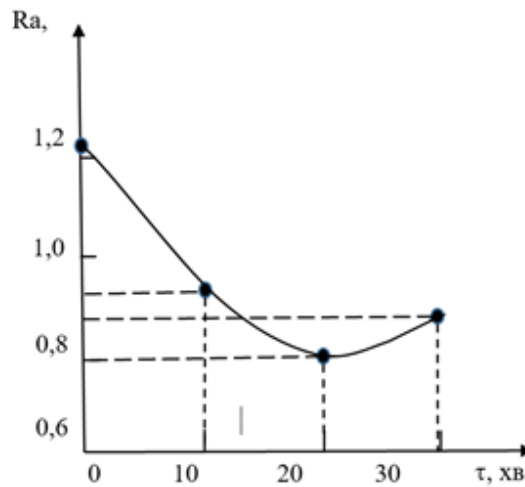


Рисунок 5 – Залежність шорсткості поверхневого шару від часу обробки ППД

Основні позитивні ефекти в процесі ультразвукової дробоструминної обробки спричинені пластичною деформацією поверхні. Під дією кульок відбуваються структурні зміни в поверхневому шарі, збільшується густина дислокацій, формуються залишкові напруження стиску, що призводить до зміни властивостей.

Після обробки ППД з чавуну, який піддавали ізотермічному гартуванню з витримкою при 300°C, виготовляли мікрошліфи та вимірювали мікротвердість за перерізом. Результати вимірювань наведені на рис. 6.

З графіку видно, як змінюється мікротвердість зміцненого шару за глибиною.

Дослідження показали, що після обробки поверхневим пластичним деформуванням збільшується мікротвердість і зменшується шорсткість зубів зубчастих колес. Аналіз літературних джерел показав, що в поверхневому шарі також формуються залишкові напруження стиску [7]. Однією з причин збільшення мікротвердості поверхневого шару, вірогідно, є структурні зміни, які відбуваються в бейнітно-аустенітно-феритній структурі.

Під дією механічного впливу можливе істотне подрібнення структури, мають місце фазові перетворення – залишковий аустеніт перетворюється в мартенсит. В літературі відмічають можливість, навіть, утворення наноструктурного тонкого шару на поверхні [7]. Глибина нанокристалізованого шару залежить від параметрів дробоструминної обробки, але зазвичай становить від 10 до 50 мкм за даними різних дослідників [7].

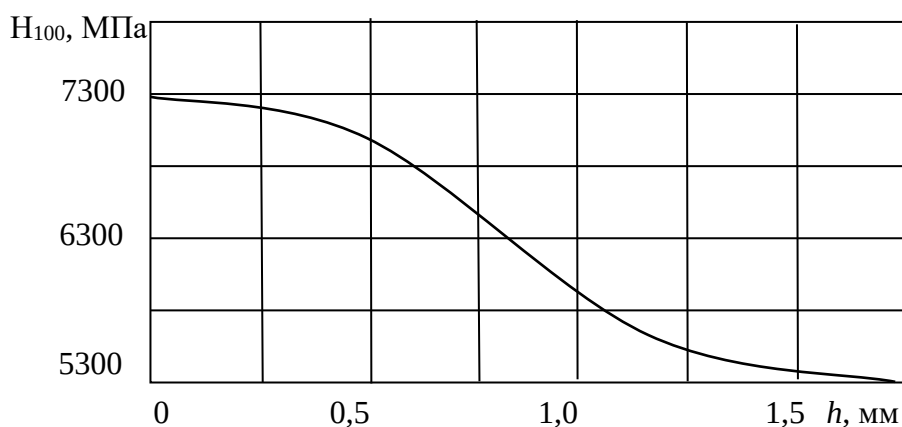


Рисунок 6 – Мікротвердість поверхневого шару після ізотермічного гартування та обробки ППД

Проводили дослідження втомної міцності, що є важливим показником для зубчастих коліс, які працюють в умовах ударних циклічних навантажень, після ізотермічного гартування і обробки ППД [8]. Результати представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Вплив термічної обробки та ППД на показник втомної міцності

Температура ізотермічної витримки	Втомна міцність після ізотермічного гартування, $\sigma_{-0,1}$, МПа	Втомна міцність після ізотермічного гартування + ППД, $\sigma_{-0,1}$, МПа
1. 300°C	450	660
2. 350°C	400	610

Ультразвукове дробоструминне зміцнення істотно підвищує втомну міцність (на 46-52 %) за рахунок заліковування дефектів, створення напружень стиску, структурних змін в поверхневому шарі.

Проводили порівняння зносостійкості зразків з високоміцного чавуну, які піддавали ізотермічному гартуванню та ультразвуковій дробоструминній обробці, та із сталі 40Х, яка використовується для виготовлення шестерен головної передачі, після гартування СВЧ.

Порівняльні зносні випробування показали, що зносостійкість високоміцного бейнітного чавуну вище, чим середньовуглецевої сталі, яку піддавали гартуванню СВЧ (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати випробувань на зносостійкість

Матеріал	Сумарний знос I в міліграмах за 140 год випробувань
1. ВЧКГ після ізотермічного гартування та витримки при 300°C	0,071
2. Сталь 40Х після гартування СВЧ	0,078

Таким чином на основі проведених досліджень можна рекомендувати для виготовлення шестерен головної передачі автомобіля КРАЗ легований міддю та молібденом високоміцний чавун з кулястим графітом, який піддають комбінованій обробці: для забезпечення високого рівня механічних властивостей за перерізом деталі чавун запропоновано піддавати

ізотермічному гартуванню з температури 900°C з ізотермічною витримкою при 300°C; для підвищення зносостійкості, втомної міцності та взагалі експлуатаційного ресурсу рекомендовано піддавати шестерні зміцнювально-оздоблювальній обробці ультразвуковим дробоструминним зміцненням.

Висновки

1. Встановлено, що зубчасті колеса головної передачі автотракторної техніки працюють в умовах ударно-циклічного контактного навантаження ковзанням.

2. Показано, що для забезпечення надійної роботи зубчасті колеса повинні мати велику твердість і зносостійкість поверхневого шару, високу контактну витривалість, втомну міцність, а також в'язку, пластичну серцевину.

3. Запропоновано на основі аналізу умов роботи та літературних джерел в якості матеріалу зубчастого колеса використовувати високоміцний чавун з кулястим графітом після ізотермічного гартування.

4. Показано, що для отримання високої твердості та зносостійкості та забезпечення високого рівня контактної витривалості та втомної міцності після термічної обробки необхідно проводити ультразвукову дробоструминну обробку; визначено оптимальні режими обробки для отримання високого рівня якості та втомної міцності чавуну.

5. Показано, що високоміцний чавун після ізотермічного гартування та ультразвукового дробоструминного зміцнення, має більш високу зносостійкість, чим сталь, з якої виготовляють зубчасті колеса.

Список використаних джерел

1. Паливода Ю. Є., Капаціла Ю. Б., Ткаченко І. Г. Технологія оброблення зубчастих коліс : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 136 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/17942>.

2. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навч. посіб. для студентів машинобуд. спец. усіх форм навчання. Харків : НТУ «ХП», 2020. 275 с. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/dmpm/wp-content/uploads/sites/86/2020/09/Navchalnij_posibnik_DETALI-MASHIN.pdf.

3. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/60787657.pdf>.

4. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості : навч. посіб. / С. С. Дяченко та ін. ; ред. С. С. Дяченко. Харків : ХНАДУ, 2016. 348 с.

5. Волощенко С. М. Створення наукових засад структуроутворення в чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.02. Київ, 2017. 236 с.

6. Зміцнення деталей за допомогою поверхнево-пластичної деформації / В. В. Паніна та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2020. Т. 2, № 10. С. 148–155. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/12935/1/Науковий%20вісник%20ТДАТУ%202020%20Випуск%2010,%20Том%202.pdf>.

7. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст] : навч. посіб. / А. Г. Фесенко та ін. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. 104 с. URL: http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/a96c0b4097bdde8f1a71abeca0cae5deMetodi-poverxnevogo-zmicnennya-u-procesi-vigotovlennya-detalej-mashin_Bechke.pdf.

8. Ji S., Roberts K., Fan Z. Effect of shot peening on fatigue performance of ductile iron castings. *Materials Science and Technology*. 2002. Vol. 18, no. 2. P. 193–197. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708301225000572>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ X12 У СХРЕЩЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ПОЛЯХ ⁹

Олександр АРХІПЦЕВ, здобувач вищої освіти групи МС-26т1-23,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Досліджено вольт-амперні характеристики тліючого розряду в магнітному полі і без нього. Проаналізовано експериментальні результати зміни мікротвердості поверхні та структурно-фазових перетворень зразків з інструментальної сталі X12 при іонному азотуванні в схрещених електричних та магнітних полях.

Ключові слова: іонне азотування; схрещені електричні та магнітні поля; фазовий склад та мікроструктура азотованого шару; тліючий розряд.

RESEARCH OF ION NITRATION OF TOOL STEEL X12 IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

Oleksandr ARKHIPTSEV, student of group MC-26t1-23,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Annotation. The current-voltage characteristics of a glow discharge in a magnetic field and without it are investigated. The experimental results of changes in surface microhardness and structural-phase transformations of samples of tool steel X12 under ionic nitriding in crossed electric and magnetic fields are analysed.

Keywords: ionic nitriding; crossed electric and magnetic fields; phase composition and microstructure of the nitride layer; glow discharge.

Вступ

Азотування є ефективним, але малопродуктивним процесом поверхневого зміцнення сталей та сплавів. Велика тривалість технологічного циклу визначається відносно низькою дифузійною рухливістю атомів азоту в області температур 450-550°C. У зв'язку з цим, безперечно, актуальними є дослідження, спрямовані на інтенсифікацію процесу іонного азотування. Використання схрещених електричних і магнітних полів дозволяє значно підвищити енергію частинок, що впливають на поверхню, що обробляється. У результаті процес дифузійного насичення поверхневих шарів сталі іонами та атомами азоту значно прискорюється [1].

Застосування магнітного поля при іонному азотуванні в тліючому розряді дозволяє також збільшити температуру та швидкість нагрівання поверхні, що пояснюється вищою

⁹ Робота виконана під керівництвом професора В'ячеслава СТОЛБОВОГО

щільністю іонного струму, внаслідок збільшення генерації заряджених частинок електронами, що утримуються магнітним полем [2].

Про характер зміни енергії заряджених частинок можна міркувати, досліджуючи вольтамперні характеристики (ВАХ) тліючого ряду з магнітним полем і без нього. ВАХ є однією з основних характеристик тліючого розряду, суттєвий вплив на неї мають робочий тиск (P) та індукція магнітного поля (B) [3–6].

Мета та завдання роботи

Метою даної роботи є:

- дослідження ВАХ тліючого розряду при різних тисках з магнітним полем та без нього;
- вивчення фізико-механічних властивостей зразків з інструментальної сталі X12 після іонного азотування у схрещених електричних та магнітних полях;
- дослідження способу іонного азотування у схрещених електричних та магнітних полях.

Матеріал і методи дослідження

Експериментальна установка для дослідження характеристик тліючого розряду в схрещених електричних і магнітних полях була створена на базі серійної вакуумно-дугової установки Булат-3. Зразки з інструментальної сталі X12 попередньо термооброблені (температура відпуску 600°C).

Вакуумна камера була оснащена магнетроном з індукцією магнітного поля $B = 0,03$ Тл. У якості робочого газу використовувався: аргон і суміш, що складається з азоту, аргону та ацетилену (N_2 75 % + Ar 20 % + C_2H_2 5 %). Тиск робочого газу варіювався в діапазоні від 5 Па до 200 Па і контролювався за допомогою вакуумметра ВІТ-3. Робоча температура (490–510°C) досягалася за 2...3 хвилини. Вимірювання температури підкладок проводилися за допомогою оптичного пірометра.

Заміри мікротвердості поверхні виконувалися на мікротвердомірі ПМТ-3. Рентгеноструктурні дослідження проводились за допомогою дифрактометра ДРОН-3. Дослідження мікроструктури зміцненого шару – за допомогою растрового електронного мікроскопа JEOL.

Результати дослідження

Встановлено, що при збільшенні тиску робочого газу до 150 Па в розряді плазма локалізується біля електродів, при цьому значно зростає інтенсивність її свічення за рахунок збільшення числа актів іонізації (рис. 1).

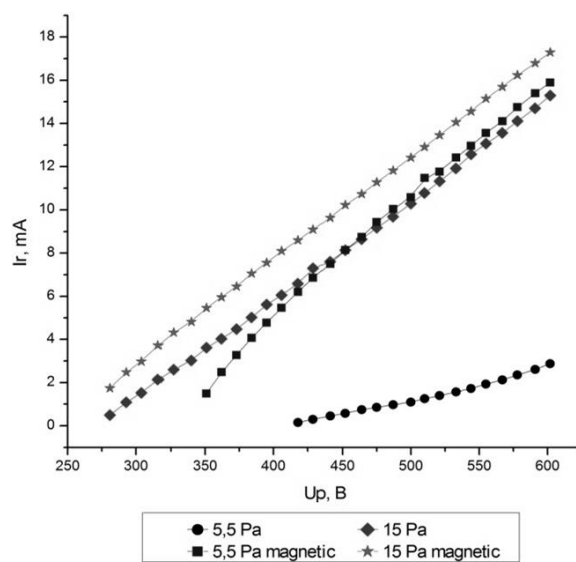
Свічення позитивного стовпа та області негативного свічення розряду фіолетове, катодний шар оранжевий, анодний шар рожевий (рис. 1).

Після напуску газу протягом перших 3–5 хвилин позитивний стовп розпадається на окремі шари, розділені темними проміжками. При тиску робочого газу 150 Па, яскраве свічення плазми у формі тора практично «лягає» на катод (рис. 1).

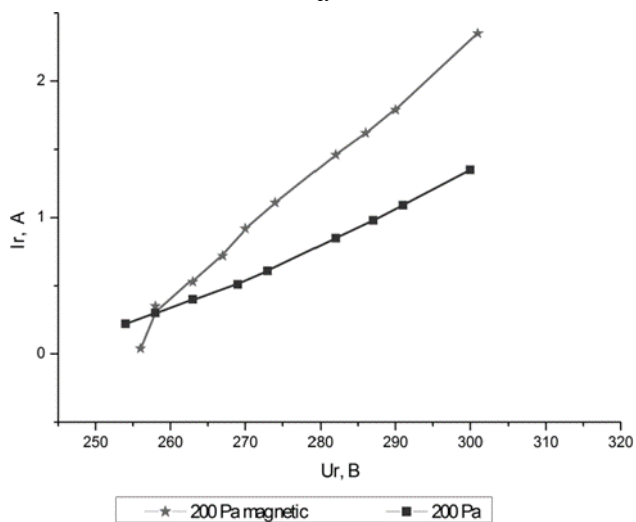


Рисунок 1 – Тліючий розряд у магнітному полі при тиску 150 Па

На рис. 2 представлені ВАХ тліючого розряду з магнітним полем і без нього.



а



б

а – режим іонного очищення, б – режим насичення

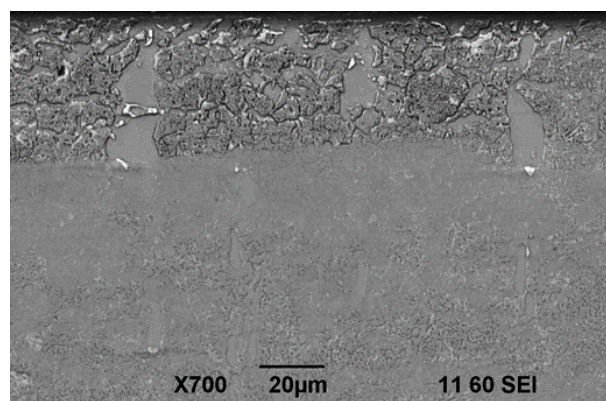
Рисунок 2 – ВАХ тліючого розряду з магнітним полем (magnetic) і без нього

Аналіз ВАХ у режимі іонного очищення (рис. 2, а) показав, що зростання струму розряду в присутності магнітного поля відбувається значно інтенсивніше порівняно з ВАХ без нього, це в свою чергу призводить до ефективного розпилення оксидної плівки внаслідок збільшення концентрації та кінетичної енергії. Порівняння ВАХ при тиску 200 Па (рис. 2, б) показало, що наявність магнітного поля дозволило збільшити струм розряду з 1,3 до 2,3 А при напрузі 300 В, що призводить до значного прискорення процесу дифузійного насичення оброблюваної поверхні.

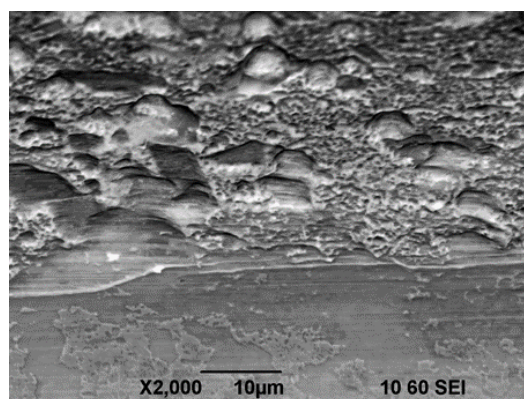
Аналіз результатів вимірів мікротвердості поверхні показав, що іонне азотування в магнітному полі призвело до значного збільшення мікротвердості в 6-6,5 разів (з 3300 до 19700...21500 МПа), що обумовлено формуванням у приповерхневому шарі нітридних фаз [3, 4].

Аналіз мікроструктури зразків із сталі X12 після обробки (рис. 3) показав наявність двох зон, між якими відсутня чітка межа:

- перша зона є суцільним шаром нітридів заліза та легуючих елементів, який на фотографіях мікроструктури виглядає майже безструктурним;
- друга зона, дифузійна область, являє собою азотистий ферит з карбідними та дрібнодисперсними нітридними включеннями.



а



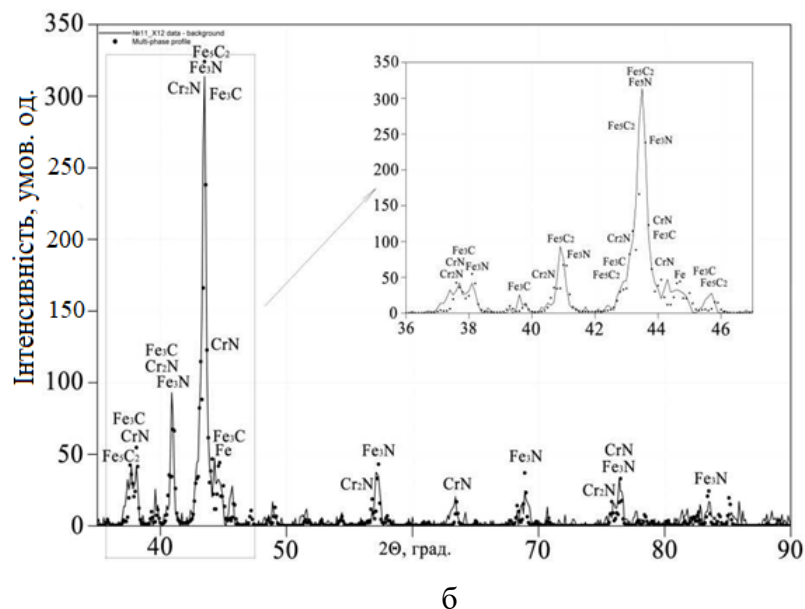
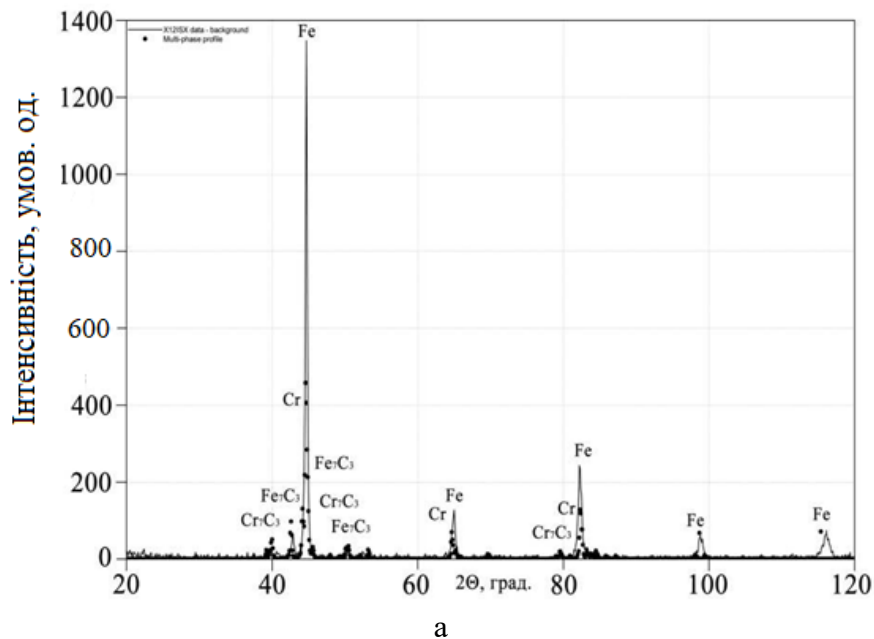
б

а – $\times 700$; б – $\times 2000$

Рисунок 3 – Мікроструктура зразка із сталі X12 після іонного азотування у магнітному полі

Відомо [3], що карбіди (Fe_3C , Fe_5C_2), що виділяються, стійкі проти значного розвитку коагуляції, що обумовлює збереження необхідної твердості та гранично можливої теплостійкості. Основною карбідною фазою є цементит – Fe_3C .

Для визначення фазового складу поверхні проведено рентгеноструктурні дослідження. На поверхні зразків після іонного азотування виявлено рефлекси ϵ -фази Fe_3N , нітридів легуючих елементів (CrN , Cr_2N , Mo_5N_6 , WN , WN_2) та карбідів заліза (Fe_5C_2 , Fe_3C) (рис. 4). Відомо [4], що нітриди заліза мають більшу теплоємність у порівнянні з залізом, при цьому створюються сприятливі умови для запобігання температурним спалахам на поверхні інструменту. Висока твердість поверхні інструменту, що не змінюється при нагріванні до 500°C , визначається наявністю нітридів хрому (CrN , Cr_2N), а зносостійкість та низька схильність до задирів – нітридами вольфраму та молібдену (WN , WN_2 , MoN).



а – у вихідному стані, б – після іонного азотування у магнітному полі
Рисунок 4 – Дифрактограми зразка із сталі X12

Висновки

1. Встановлено, що схрещені електричні та магнітні поля дозволяють значно підвищити енергію частинок, що впливають на поверхню, що обробляється.
2. Встановлено, що внаслідок іонного азотування у магнітному полі на поверхні зразків відбулося значне збільшення мікротвердості у 6–6,5 разів.
3. Встановлено, що мікроструктура сталі X12 після обробки складається з нітридного шару та дифузійної зони, між якими відсутня чітка межа.
4. Встановлено, що на поверхні зразків із сталі X12 після обробки формується суцільний шар нітридів, що складається з нітридів заліза та легуючих елементів (Fe_3N , CrN , Cr_2N).
5. Розроблено спосіб азотування в тліючому розряді з накладенням магнітного поля, що дозволяє проводити модифікування поверхні інструментальних сталей і забезпечити високу кінетичну ефективність процесу дифузійного насичення.

Список використаних джерел

1. Anders A. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. New York / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto : John Wiley & Sons, Inc., 2000. 760 p. URL: https://media.wiley.com/product_data/excerpt/80/04712469/0471246980.pdf.
2. Sun Y., Bell T. Plasma surface engineering of low alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*. 1991. Vol. 140. P. 419–434. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90458-y](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90458-y).
3. Пастух І. М. Теорія та практика безводневого азотування в тліючому розряді. Харків : ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
4. Андрєєв А. О., Шаблев Л. П., Григор'єв С. М. Вакуумно-дугові покриття. Харків : ННЦ ХФТИ, 2010. 318 с.
5. Slycke J., Sproge L., Ågren J. Nitrocarburising and ternary Fe-NC phase diagram. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1988. No. 17. P. 122–126. URL: https://www.researchgate.net/publication/290839891_NITROCARBURIZING_AND_THE_TERNARY_Fe-C-C_PHASE_DIAGRAM.
6. New trends on nitriding in low pressure arc discharges studied by optical emission spectroscopy / N. Renevier et al. *Surface and Coatings Technology*. 1996. Vol. 86-87. P. 285–291. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(96\)02952-0](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(96)02952-0).

ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКА ЯКОСТІ ТА ПІДБІР ЗНОСОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ¹⁰

Антон ЗАВЕЗИСТУП, здобувач вищої освіти групи МС-51-24
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. В статті розглянуті можливості застосування термоелектричного методу неруйнівного контролю для підбору зносостійких наплавочних сталей, які забезпечують підвищення довговічності штампового інструменту. Показано, що для підвищення зносостійкості поверхні інструменту штампів бажано застосовувати сплави, в яких у поєднанні з маркою оброблюваного матеріалу сумарна Т. Е. Р. С. прагне до нуля. Встановлено, що застосування термоелектричного експрес-методу неруйнівного контролю дозволяє оперативно визначати найбільш небезпечні локальні місця можливого руйнування.
Ключові слова: сталь, зносостійкість, термоелектричний метод неруйнівного контролю.

EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE QUALITY AND SELECTION OF WEAR-RESISTANT MATERIALS USING THERMOELECTRIC METHOD OF CONTROL

Anton ZAVEZYSTUP, student of group MC-51-24
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The article discusses the possibility of using thermo-electric NDT method for the selection of wear-resistant surfacing of steels that increase the durability of the punching tools. It is shown that to improve the wear resistance of the surface of tool dies is desirable to use alloys that are combined with the brand name of a processed material total T. E. D. S. tends to zero. It is established that the application of thermo-electric Express NDT method allows one to quickly determine the most dangerous local places of potential damage.
Key words: steel, wear resistance, thermoelectric NDT method.

Вступ

В даний час розробка нових методів дослідження напруженого деформованого стану матеріалів, розширення можливостей існуючих методів неруйнівного контролю набуває все більшого значення. Особливо важливим є розширення використання фізичних методів неруйнівного контролю, заснованих на вивченні внутрішніх процесів, що відбуваються в деформованому матеріалі.

¹⁰ Робота виконана під керівництвом доцента Валерія БАГРОВА

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із найважливіших засобів підвищення якості надійності виробів, що несуть значні теплові та механічні навантаження, є неруйнівний контроль. Неруйнівний контроль успішно застосовується у виробництві на різних етапах технологічного процесу, а також під час експлуатації готового виробу для оцінки його подальшого ресурсу [1].

Експериментальні методи дослідження напруженого деформованого стану матеріалів є одними з основних при оцінці рівня в деталях і конструкціях як у пружній, так і в пружно-пластичній області деформування.

Поверхневий шар деталей, несучих контактні циклічні навантаження (термічні та механічні), знаходиться в напруженому стані всебічного нерівномірного стиснення, інтенсивність якого періодично змінюється. Крім того, на напружений стан, створений зовнішніми силами, накладаються внутрішні термічні та структурні напруження. При наплавленні легованими сталями до зовнішніх і вищевказаних внутрішніх напружень додатково накладаються залишкові напруження, викликані термічним циклом зварювання та внутрішні напруження, обумовлені розходженням фізичних і механічних властивостей покриття та основи. Поверхневий шар в процесі експлуатації може зазнавати значних пластичних деформацій. Внаслідок цього в більшості випадків руйнування починається з поверхневого шару і, отже, міцність і зносостійкість деталей, несучих контактні навантаження, визначається переважно якістю поверхневого шару [2].

Особливо погіршують якість поверхневого шару різного роду дефекти (неоднорідності, структурні неоднорідності тощо). Вони знижують міцність, зносостійкість та експлуатаційну надійність деталей та інструменту.

Оскільки в процесі динамічного контактного навантаження поверхневі шари металу безпосередньо сприймають основне навантаження, необхідною умовою підвищення контактної міцності та довговічності матеріалу є спрямований вибір їх системи легування та хімічного складу. У зв'язку з цим виникає необхідність у застосуванні різних методів випробування (фізичних, механічних) для співставлення експлуатаційних характеристик, отриманих як при найпростіших навантаженнях (розтяг, стиск, кручення), так і в умовах складного напруженого стану при нормальних і високих температурах. Результати цих випробувань є основною інформацією про матеріалі при розрахунку в умовах дії будь-якої складної системи напружень. При цьому закономірності деформування та руйнування твердих тіл вивчаються, як правило, на основі усереднених характеристик механічних властивостей матеріалу. Експериментальні дослідження при складному напруженому стані, особливо в умовах високих температур, пов'язані з великими труднощами при постановці експерименту.

У багатьох випадках бажано отримання досліджуваних характеристик матеріалу з мінімальною кількістю зразків, підданих перевірочним руйнівним випробувань. Особливо ця проблема актуальна при дослідженні напруженого стану в зразках і деталях, відновлених наплавленням.

В даний час розробка нових методів дослідження напруженого деформованого стану матеріалів, розширення можливостей існуючих методів неруйнівного контролю набуває все більшого значення. Особливо важливим є розширення використання фізичних методів неруйнівного контролю, заснованих на вивченні внутрішніх процесів, що відбуваються в деформованому матеріалі.

Мета дослідження

Обґрунтувати можливість застосування термоелектричного методу неруйнівного контролю для підбору зносостійких сплавів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження були направлені на вивчення впливу робочих температур штампів і процесів тертя на зносостійкість і контактну міцність наплавочних матеріалів, які умовно можна розбити на чотири групи.

До першої групи віднесені метастабільні аустенітні сталі системи Cr-Mn на основі заліза додатково леговані Ti та Si, до другої – вториннотвердіючі сплави системи Cr-Mn-Mo на основі заліза. В якості основного елемента для зв'язування вуглецю в цих групах прийнятий Ti. До третьої та четвертої групи в якості матеріалів для порівняння прийняті сталі 5ХНМ та 08Х6Н8М7С.

Хімічний склад сталей першої та другої груп варіювали за змістом таких елементів, як С, Mn, Ti. Вміст Cr було прийнято до 3 %, Mo ~5-7 %. Співвідношення Ti та С підтримували в межах $Ti/C = 0,24:0,25$ ат (%).

Титан в якості основного карбідоутворюючого елемента був прийнятий, виходячи з вимог високої стійкості наплавлювальних сплавів в умовах абразивного зношування та ударних навантажень: структура сплаву повинна складатися з мартенситно-аустенітної або мартенситної матриці та рівномірно розподілених карбідів; твердість карбідів повинна бути максимальною, а їх кількість знаходиться в межах 20-30 %.

Орієнтовний хімічний склад наплавленого металу визначали з урахуванням перемішування основного та наплавленого металу, коефіцієнтів засвоєння легуючих елементів та інших величин.

Наплавлення виконували трактором ТС-17М та автоматичною головкою А-1416 на пластини розміром 200×150×25 мм зі сталі 20, 500×300×40 мм із сталі 45 і 400×50×40 зі сталі 5ХНМ. В якості захисного флюсу для наплавлення порошковими дротами з системами легування Cr-Mn-Ti та Cr-Mn-Mo-Ti на основі заліза був прийнятий флюс АН-22. Вихідна основність флюсу АН-22 – В = 1,4668, хімічна активність – А_ф = 0,1819.

Вирізуку зразків для дослідження властивостей наплавленого металу виконували абразивними відрізними кругами з наступним шліфуванням і поліруванням.

Лабораторні випробування проводили на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «диск-колодка». Режими тертя: швидкість обертання диска $U = 0,5$ м/с; навантаження – $N = 25; 50$ Н. Матеріал контртіла сталь 40Х термооброблена, HRC 47-49.

В якості основного методу дослідження впливу процесів тертя на міцнісні властивості досліджуваних матеріалів використовувався термоелектричний метод неруйнівного контролю. Даний метод заснований на ефектах, пов'язаних з виникненням у металах термоелектрорушійної сили (Т. Е. Р. С.) [3]. У зв'язку з відсутністю прямої залежності між величиною Т. Е. Р. С. і температурою спаю термопар, вимірювали коефіцієнт Т. Е. Р. С., тобто величину Т. Е. Р. С. на 1 градус.

Для дослідження використовувалися зразки, які випробувані на зносостійкість на установці 2070 СМТ-1, із сталей 50ХНМ, 40Х4Г8Т2С, 08Х6Н8М7С 20Х3Г9М5Т2С.

Крім цього, вимірювався коефіцієнт Т. Е. Р. С. сталі 45 і 35ХГСА (сталь, що застосовується на заводі АТ «Світло шахтаря» для виготовлення сережки).

Схема точок виміру коефіцієнта Т. Е. Р. С., наведена на рис. 1. Точки вимірів коефіцієнтів Т. Е. Р. С. приймалися в місцях можливих змін напруженого стану після випробувань на тертя.

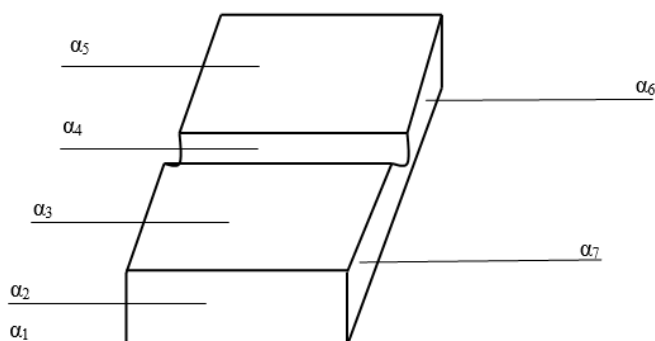


Рисунок 1 – Схема точок виміру коефіцієнта Т. Е. Р. С.

Результати вимірювання коефіцієнтів Т. Е. Р. С. досліджуваних матеріалів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів Т. Е. Р. С. досліджуваних матеріалів

Точка виміру	50ХНМ	08Х6Н8М7С	20Х3Г9.М5Т2С	40Х4Г8Т2С
α_1	+4,6-4,7	+4,5-4,6	-6,1-6,2	-5,5-5,6
α_2	+4,4-4,7	+5,6-5,7	-6,0-6,1	-5,2-5,6
α_3	+4,6-4,7	+5,6-5,7	-6,1-6,2	-6,2-6,3
α_4	+4,1-4,2	+5,2-5,3	-5,9-6,0	-6,5-6,7
α_5	+4,4-4,5	+5,1-5,2	-6,0-6,1	-6,6-6,8
α_6	+4,7-4,9	+4,6-4,7	-6,2-6,3	-6,3-6,4
α_7	+4,8-4,9	+4,6-4,7	-6,2.-6,3	-6,6-6,7

Значення коефіцієнтів Т. Е. Р. С. сталі 45 і 35ХГСА відповідно склали +3,8-3,9 мкВ/°С і +5,9-6,0 мкВ/°С.

Аналіз результатів значень коефіцієнтів Т. Е. Р. С. показує, що їх значення коливаються в невеликих межах і за їх величиною, з урахуванням різниці температур гарячого та холодного електродів, досліджувані матеріали можна розкласти в термоелектричний ряд відносно міді: 20Х3Г9М5Т2С $E = -433 \cdot 10^{-6}$ В, 40Х4Г8Т2С $E = -389 \cdot 10^{-6}$ В, мідь $E = 0$ В, сталь 45 $E = +273 \cdot 10^{-6}$ В, 08Х6Н8М7С $E = +315 \cdot 10^{-6}$ В, 50ХНМ $E = +329 \cdot 10^{-6}$ В, 35ХГСА $E = +420 \cdot 10^{-6}$ В.

Примітка: Знак «+» показує, що струм тече від міді до металу через гарячий електрод, знак «-» – через холодний електрод.

Знаючи потенціали в зіткненнях металів, можна судити про величину поверхневої енергії на межі їх торкання. Різниця потенціалів контактуючих пар викликає розсіювання тільки тих електронів провідності, постачальником яких є метал з великим хімічним потенціалом. Тобто, в цьому металі акумулюється поверхнева енергія, в той час як з боку іншого металу вона різко знижується. Про механізм провідності сплавів можна також судити по процентному змісту та типу власної провідності легуючих елементів [3]. Підвищення рухливості дислокацій у процесі тертя контактуючих пар обумовлюється не тільки дією напружень, але і підвищенням температури. Це викликає прискорення пластичної деформації в поверхневому шарі, що впливає

на зміну поверхневої енергії. Таким чином, при одних і тих же розмірах контактних плям термострум, що протікає через них, буде різним. Для збільшення довговічності терміну служби бажано, щоб термоток був мінімальний. Отже, при інших рівних умовах повинна бути найменшою та термоелектрорушійна сила, яка обумовлює цей струм. Розрахунок сумарних Т. Е. Р. С. у контурі гарячий електрод (мідь марки М1) – сплав – сталь 45 – холодний електрод (мідь марки М1) з урахуванням знаків показав, що термострум мінімальний в парі сталь 45 – сплав 20ХЗГ9М5Т2С, хоча зносостійкість у порівнянні з іншими сплавами вище при лабораторних випробуваннях.

Виробничі випробування відновлених наплавленням матриць гарячого деформування деталей зі сталі 35ХГСА підтвердили отримані результати лабораторних досліджень щодо встановлення кореляції між зносостійкістю та сумарним термострумом контактуючих матеріалів.

Результати лабораторних досліджень і виробничих випробувань цілком узгоджуються з положеннями про електричні явища при терті, викладеними в роботах Костецького Б. В., Крагельського В. В., Постнікова С. Н. Отримані значення коефіцієнтів Т. Е. Р. С. α_3 , α_4 , α_5 і α_6 свідчать про зміни властивостей металу як у поверхневому шарі (α_4), так і в підповерхневих його шарах, що також підтверджується вимірюваннями мікротвердості зразків тертя та металографічними дослідженнями.

Отримані результати лабораторних досліджень і виробничих випробувань наплавленого металу свідчать про можливість застосування термоелектричного методу неруйнівного контролю для підбору контактуючих пар, які забезпечують підвищення зносостійкості та довговічності обробного інструменту.

Для дослідження зон концентрації напружень термоелектричним методом використовувалася наплавлена матриця К 49793 із сталі 50ХНМ. Коефіцієнт Т. Е. Р. С. вимірювали переміщенням електродів пристрою по гравюрі матриці (окремо по металу шва та зоні термічного впливу). Потім виконували поперечні переміщення відносно гравюри з амплітудою 10...20 мм у бік основного металу. Показання приладу реєструвалися зі знаками «+» і «-». За середні значення коефіцієнта Т. Е. Р. С. на гравюрі прийняті виміряні на прямолінійних ділянках. У навколошовній зоні за середнє значення коефіцієнта Т. Е. Р. С. прийняті показання для сталі 50ХНМ. Стрибокподібна зміна знаку та величини коефіцієнта Т. Е. Р. С. вказує на зони концентрації напружень.

Результати розподілу коефіцієнта Т. Е. Р. С. і його точки вимірів показані на рис. 2. Зони максимальних концентрацій напружень показано на лініях зміни знаків коефіцієнтів Т. Е. Р. С.

Аналіз рівнів концентрації напружень показує, що найбільші напруження в наплавленому металі виникають в області точок 9-10, де крім дії дотичних напружень в процесі експлуатації, змінюється характер напруженого стану через геометрію матриці. Це, згідно з критерієм Мізеса-Генки, веде до збільшення напружень, необхідного для виникнення локального течії матеріалу. Внаслідок зміни напруженого стану величина межі плинності досягає межі обмеженої плинності, що спричиняє до виникнення концентрації напружень і деформацій.

В сталях 08Х6Н8М7С і 20ХЗГ9М5Т2С в результаті дослідження виявлено більш протяжний зміцнений шар, в структурі якого спостерігаються характерні пластинчасті освіти. Враховуючи численні літературні дані про схильність металів з низькою енергією дефектів пакування до двійникування деформації, можна припустити, що новоутворення, які спостерігаються в зоні тертя, являють собою специфічні двійники деформації, що утворилися в

умовах підвищених температур. Додатковий внесок у зміцнення двійникової зони в цих сплавах вносить виділення дисперсних карбідів.

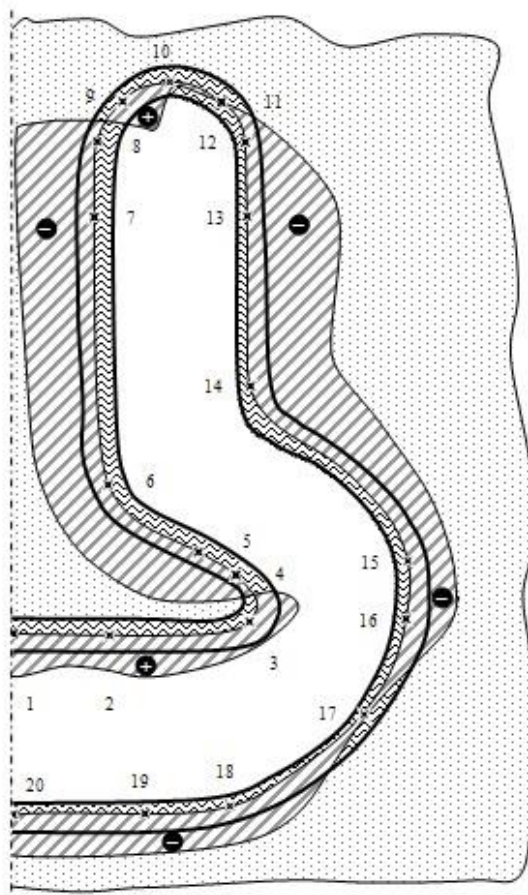


Рисунок 2 – Розподіл середніх значень коефіцієнтів Т. Е. Р. С. в вимірних перетинах гравюри матриці

Для всіх досліджених сплавів характерним є поступове зменшення розкиду значень мікротвердості по глибині зони тертя.

Зміна мікротвердості в приповерхневих шарах на стадії усталеного зношування, по всій видимості, обумовлено тим, що паралельно відбуваються процеси взаємної дифузії матеріалів пари тертя, виборчого окислення та термодифузійного перерозподілу зміцнюючої фази під дією деформацій і температур, викликаних тертям.

Перелічені структурні зміни справляють різний вплив на інтенсивність зношування досліджуваних матеріалів. Низька здатність до зміцнення, незважаючи на присутність «білої смуги», призводить до підвищення темпу зносу та передчасного переходу до стадії усталеного зношування. Двійникування та виділення карбідів по двійникам (сталі 40X4Г8Т2С, 08Х6Н8М7С 20Х3Г9М5Т2С) підвищує опірність пластичним зсувам при підвищених температурах, ускладнюючи руйнування робочих об'ємів при терті.

З досліджених матеріалів найбільшою зносостійкість має сталь 20Х3Г9М5Т2С. Підвищену зносостійкість цієї сталі можна пояснити, з одного боку, оптимальним фазовим складом, з іншого – низькою енергією дефектів пакування, що забезпечує схильність до деформаційного двійникування при підвищених температурах. Двійникування сприяє зміцненню приконттактних обсягів металу, тим самим знижуючи інтенсивність зношування, що пов'язано з дією механізму Мотта-Набарро. Зміна дислокаційної структури прикордонних областей і

характеру старіння (перерозподіл карбідної фази), що відбуваються в результаті дії підвищених температур і деформацій, є одним з основних факторів підвищення контактної міцності та мікропластичності поверхневих шарів сталі 20ХЗГ9М5Т2С.

Висновки

1. В результаті проведених досліджень показана можливість застосування термоелектричного методу неруйнівного контролю для підбору зносостійких наплавочних сталей, які забезпечують підвищення довговічності штампового інструменту. Встановлено, що для підвищення зносостійкості та довговічності поверхні обробного інструменту штампів гарячого деформування бажано застосовувати сплави, у яких у поєднанні з маркою оброблюваного матеріалу сумарна $T \cdot E \cdot R \cdot C$ прямує до нуля.

2. Застосування термоелектричного експрес-методу неруйнівного контролю дозволяє оперативно визначати найбільш небезпечні локальні місця, які характеризуються критичними зонами концентрації напружень і своєчасно застосовувати заходи для їх усунення.

Список використаної літератури

1. Троїцький В. А. Неруйнівний контроль за якістю в Україні на рубежі століть. *Неруйнівний контроль та технологічна діагностика 2000* : Праці ІІІ Укр. науково-техн. конф. Дніпропетровськ, 2000. С. 8–16.

2. Шкілько О. М. Неруйнівні методи контролю металів та вузлів енергетичного обладнання. Київ : ІСІО, 1994. 180 с.

3. Нові можливості неруйнівного контролю поточного стану прокатних валків листопрокатних виробництв щодо вимірювання розподілу магнітних характеристик робочого шару / Г. Я. Безлюдько та ін. *Неруйнований контроль та технологічна діагностика 2000* : Праці ІІІ Укр. науково-техн. конф. Дніпропетровськ, 2000. С. 150–151.

ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ОСЕЙ РЕМКОМПЛЕКТУ ПІДВІСКИ ТРАКТОРА ¹¹

Олександр ВОЗНІЮК, здобувач вищої освіти групи МС-51-24
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Показано, що м'яке азотування поверхні осей підвіски трактора дозволило збільшити їх ресурс на 25 % .*

***Ключові слова:** азотування, товщина шару, осі підвіски, поверхня, серцевина, міцність, пластичність, в'язкість, ресурс.*

INCREASE THE RESOURCE OF THE AXES OF THE REPAIR KIT OF THE TRACTOR SUSPENSION

Oleksandr VOZNIUK, student of the group MC-51-24
Kharkiv National Automobile and Highway University

***Abstract.** It was shown that mild nitriding of the surface of the tractor suspension axles increased their service life by 25 %.*

***Key words:** nitriding, layer thickness, suspension axes, surface, core, strength, ductility, toughness, service life.*

Вступ

Ефективність використання будь-якої транспортної машини багато в чому залежить від надійності складальних одиниць і деталей, які працюють під постійним впливом багатьох факторів, що негативно впливають на їх технічний стан, знижують експлуатаційні характеристики. Деградаційні процеси, які пошкоджують окремі деталі, погіршують умови роботи машини в цілому, хоча вона залишається ще цілком роботопридатною. Щоб отримати повне відновлення машини потрібно замінювати пошкоджені деталі новими, або забезпечувати збільшення ресурсу використовуючи зміцнюючі технології [1, 2].

Значна частина тракторів, які ще експлуатуються сьогодні, були випущені понад 25-30 років і тому вже суттєво зношені. Перспектива їх заміни в найближчий час не передбачається у зв'язку із воєнним станом нашої країни та із загальним падінням виробництва, та основне навантаження припадає на ремонтні підприємства. Підвищення експлуатаційних властивостей і терміну працездатності ремонтних комплектів ресурсовизначальних вузлів машин є на часі та практично конче необхідним.

¹¹ Робота виконана під керівництвом професора Ірини ДОЩЕЧКІНОЇ

Літературний огляд

Одним з вузлів трактора, що часто достроково виходять з ладу, є система підвіски, яка експлуатується в жорстких умовах інтенсивного абразивного зношування (розбита ґрунтова дорога з добавками гравію та шлаку, кар'єр та ін.), а також під впливом значної вологості у різні пори року [2, 3]. Достроковий вихід з ладу однієї деталі системи підвіски призводить до тривалого простою трактора та сполучених з ним агрегатів – бульдозерів, скреперів та ін.

До деталей, які є причиною передчасних відмов трактора належать вісь підтримуючого ролика та вісь котка підвіски. Окрім агресивного зношування та корозії осі піддаються ударним і циклічним навантаженням, тому поверхня їх повинна бути зносо- та корозійностійкою, а серцевина – досить пластичною та в'язкою при достатній міцності [4].

Осі виходять з ладу по причині інтенсивного зношування, чому сприяє і корозія поверхні. Для підвищення довговічності поверхня осей повинна бути більш зносо- та корозійностійкою. Одним із методів обробки, який би забезпечив експлуатаційні умови осей, є азотування поверхні з попередньою об'ємною термічною обробкою – покращення для серцевини азотованих деталей [4]. Нині азотування набуває дедалі все більшого застосування, завдяки тому, що азотовані деталі мають виску зносостійкість, корозієстійкість, значний опір втомі, малу деформацію виробу, що обробляється, а також через відсутність необхідності додаткової обробки після азотування [5].

Основним недоліком азотування є його тривалість. Однак за необхідності прискорити процес азотування та підвищити його ефективність використовують двоетапну схему обробки металу [4, 6]. Така схема передбачає на першій стадії нагрів до температури 500-520°C для отримання глибини азотованого шару $\sim 0,5$ мм, що забезпечує підвищення поверхневої твердості та зносостійкості, корозійної тривкості. На другій стадії процесу деталь нагрівається до 600-620°C. За таких параметрів температурного режиму процес азотування істотно прискорюється, а глибина зміцненого шару досягає необхідних показників. Твердість поверхневого шару за двоступеневою технологією не поступаються той, що отримана при одноступеневому азотуванні [4].

Пошук технологій створення зносостійких поверхневих шарів, які б не погіршили властивості серцевини виробу, є актуальним в наш час, коли значно виріс об'єм ремонтних робіт застарілої сільськогосподарської та дорожньо-будівельної техніки, значну кількість якої становлять трактори. Згідно [7] одним з основних напрямів прискорення виробничих процесів і збільшення експлуатаційного ресурсу машинно-тракторного парку є «підвищення ремонтної технологічності та ефективності». Отже, навіть незначне збільшення зносостійкості таких відповідальних деталей як осі підвіски забезпечить економію металу, дозволить зменшити матеріальні та трудові витрати та підвищити працездатність трактора.

Мета дослідження

Метою досліджень було встановлення впливу товщини азотованого шару на механічні властивості та характеру руйнування виробів при розтяганні та під впливом ударного навантаження.

Матеріал і методики дослідження

На виробництві осі ремкомплекту підвіски виготовляють зі сталей 38ХГТ або 38ХСА. Термічна обробка їх – це гартування з наступним високим відпуском. Осі дуже швидко виходили з ладу через значне зношування.

Для досліджень була вибрана сталь 40Х, хімічний склад якої наведений в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 40Х

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	S, %	P, %	Ni, %	Cu, %
0,41-0,44	0,2-0,31	0,50-0,68	1,1	0,03	0,03	0,25	0,30

Стандартні циліндричні розривні зразки зі сталі 40Х ($d = 10$ мм) після покращення (гартування в оливі від температури 860°C та наступного відпуску при 650°C , 1,5 год.) піддавали азотуванню.

Азотування проводили за трьома режимами для отримання зміцнених шарів різної товщини – 0,08, 0,25 і 0,35 мм із збільшенням насичення азотом.

1-й режим: азотування при $t = 620^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1,5$ год.

2-й режим: азотування в струмені аміаку при $t = 520^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10$ год., підвищення температури до 540°C , $\tau = 20$ год., далі витримка протягом 3-х годин без подачі аміаку та охолодження до 150°C в струмені аміаку.

3-й режим полягав у повторному азотуванні зразків, оброблених за режимом № 2. Глибину азотування оцінювали по відстані від поверхні до шару із твердістю ~ 450 HV [5].

Для оцінки показників міцності та пластичності проводили випробування на розтяг циліндричних зразків на електромеханічній машині UIT STM-50 у відповідності до стандартів ISO 689284 та ASTM E8.

Ударна в'язкість визначалася на маятниковому копрі UIT IPT-300 С. Використовувались стандартні зразки із U-подібним надрізом.

Твердість азотованих шарів вимірювали на твердомірі Віккерса за стандартною методикою.

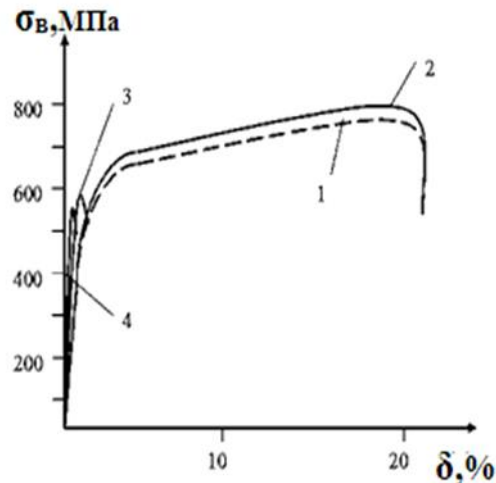
Результати досліджень

Після тристадійного процесу азотування твердість поверхні зразків дорівнювала 750 HV.

Криві розтягання та протокол випробувань зразків наведені на рис. 1 і в табл. 2.

З рис. 1 видно, що глибокі шари азотування (0,25 і 0,35 мм) призводять до падіння міцності, втрати пластичності та окрихчення (криві 3, 4). Азотування на малу глибину (0,08 мм) дещо підвищує міцність при дуже високій пластичності (крива 2), що відповідає рівню зразка, який не піддавався азотуванню (крива 1).

Таким чином, азотування на глибину $\leq 0,08$ мм не знижує конструктивної міцності виробу. Це підтверджують і статистично оброблені кількісні значення показників міцності та пластичності, що наведені в табл. 2. Після зняття азотованого шару механічні характеристики відповідають показникам після покращення.



1 – покращення; 2 – азотований шар 0,08 мм; 3 – 0,25 мм; 4 – 0,35 мм
Рисунок 1 – Залежність «напруження – деформація» для зразків зі сталі 40Х

Таблиця 2 – Механічні характеристики зразків після різної обробки

Товщина шару азотування, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %
Покращення	715	430	20	52
0,08	790	455	20	48
0,25	580	530	–	–
0,35	545	–	–	–
Знятий шліфуванням шар	715	420	21	51

Вид зразків зі сталі 40Х після руйнування при розтяганні наведений на рис. 2.



а – покращення; б – азотований шар 0,08 мм; в – 0,25 мм; г – знятий азотований шар
Рисунок 2 – Зруйновані зразки при розтяганні

Вигляд зруйнованих зразків на рис. 2 свідчить, що при азотуванні на глибину 0,25 (в) вони руйнуються абсолютно крихко. Зразки із зміцненим шаром 0,08 мм (б) руйнуються посередині робочої частини із утворенням шийки, аналогічно зразкам після покращення (а) та зі знятим азотованим шаром (г).

Аналіз зламів (рис. 3) показав, що зразки після покращення, а також зразки з видаленим азотованим шаром зруйнувалися дійсно в'язко (а і г). У зразків з азотуванням на глибину 0,08 мм спостерігається змішаний злам (на поверхні крихкий азотований шар) (б), а зразки після тривалого азотування на значну глибину руйнуються абсолютно крихко (в).



а – покращення; б – азотований шар 0,08 мм; в – 0,25 мм, г – знятий азотований шар
Рисунок 3 – Злами розривних зразків

Ударна в'язкість монотонно зменшується з товщиною азотованого шару – від 59 до 12 Дж/см². Після азотування на глибину 0,08 мм вона дорівнює 52 Дж/см². Зразок, що азотований на таку глибину при випробуванні руйнується в'язко (рис. 4).

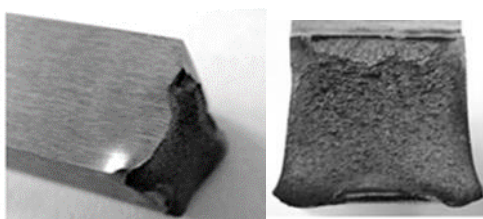


Рисунок 4 – Злам ударного зразка з глибиною азотованого шару 0,08 мм

Підвищена міцність серцевини сталі 40Х після покращення запобігає руйнації тонкого азотованого шару під дією високого тиску.

Низька температура азотування не призведе до змін геометричних параметрів осей.

Процес м'якого азотування на глибину всього до 0,08 мм був апробований на ремонтному підприємстві та забезпечив збільшення експлуатаційного ресурсу на 25 %.

Висновки

1. Товщина модифікованого азотуванням поверхневого шару суттєво впливає на поведінку виробів при розтяганні та під дією ударних навантажень. Наявність глибоких зміцнених шарів призводить до небажаного крихкого руйнування.

2. Підвищити твердість і міцність поверхні при одночасному збереженні характеристик пластичності серцевини можна при азотуванні на глибину до 0,08 мм.

3. Високі залишкові стискальні напруження, що з'являються у азотованому шарі, збільшать втомну міцність осей при роботі в умовах циклічних навантажень.

4. Азотування, як відомо, підвищує корозійну стійкість, що особливо важливо для осей підвіски, які експлуатуються в жорстких погодних умовах при значній вологості.

5. В акті апробації на ремонтному підприємстві процесу «м'якого» азотування на глибину всього до 0,08 мм зафіксовано збільшення експлуатаційного ресурсу на 25 %.

Список використаних джерел

1. Ремонт тракторів і автомобілів : навч. посіб. Кн. 1 / Д. П. Домуші та ін. Одеса : ТЕС, 2020. 191 с. URL: <http://lib.osau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3447/4/ПОСІБНИК%20РТА%20К1%202020.pdf>.

2. Ремонт машин та обладнання: підручник / О. І. Сідашенко та ін.; ред.: О. І. Сідашенко, О. А. Науменко. Київ : Агроосвіта, 2014. 665 с.
3. Ремонт тракторів і автомобілів : навч. посіб. Кн. 2 / Д. П. Домуші та ін. Одеса : ТЕС, 2024. 181 с. URL: <http://lib.osau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4699/1/Домуші%20ПОСІБНИК%20ТА%20К2%202024%20В1.pdf>.
4. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості: навч. посіб. / С. С. Дяченко та ін.; ред. С. С. Дяченко. Харків : ХНАДУ, 2016. 348 с.
5. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А. Г. Фесенко та ін. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2015. 104 с. URL: http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/a96c0b4097bdde8f1a71abeca0cae5deMetodi-poverxnevogo-zmicnennya-u-procesi-vigotovlennya-detalej-mashin_Bechke.pdf.
6. Гапонова О. П., Говорун Т. П. Інженерне матеріалознавство: навч. посіб. Суми: Сум. держ. ун-т, 2024. 403 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/98383/3/Haponova_materialoznavstvo.pdf.
7. Ластівка М. М. Експлуатація машин і обладнання. Методика вивчення дисципліни та приклади розв'язування задач: навч. посіб. Вінниця: Ладижинський коледж Вінницького національного аграрного університету, 2019. 374 с. URL: https://lad.vnau.com.ua/storage/metod_vkazivkb.pdf.

ОБГРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ FDM-ДРУКУ З МОДИФІКУВАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ¹²

Станіслав ВОРОНКОВ, здобувач вищої освіти групи АПМ-41-21,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Виконано обґрунтування оптимальних параметрів процесу FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів. Показана послідовність застосування методу аналізу ієрархії для багатокритеріальної оцінки з урахуванням різних факторів.

Ключові слова: FDM-друк, модифікування, міцність, пластичність, електромагнітне поле, полімерні матеріали, багатокритеріальна оптимізація.

JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE FDM PRINTING PROCESS WITH MODIFICATION OF POLYMER MATERIALS

Stanislav VORONKOV, student of group APM-41-21,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The justification of the optimal parameters of the FDM printing process with modification of polymer materials is carried out. The sequence of application of the analytic hierarchy process method for multi-criteria evaluation taking into account various factors is shown.

Keywords: FDM printing, modification, strength, plasticity, electromagnetic field, polymer materials, multi-criteria optimization.

Вступ

Розроблення нових перспективних полімерних матеріалів (ПМ), нових полімерних композиційних матеріалів і технологій переробки пов'язано із інноваціями останнього часу. До одного з найбільш актуальних технологічних трендів відносяться адитивні технології, в яких пошарове нарощування матеріалу відповідно до заданої комп'ютерної твердотільної моделі практично замінює традиційні процеси різання, пресування і штампування [1, 2]. Основною перевагою даних технологій у виробництві та ремонті є пряме відтворення на основі твердотільної моделі виробу будь-якої складності без застосування додаткового оснащення.

Застосування 3D-принтерів охоплює дуже широку сферу діяльності. Область використання 3D-друку розширюється, удосконалюються методи друку, знаходять застосування нові матеріали, поліпшується якість, точність і міцність виробів. Принтери для тривимірного друку зменшуються в розмірах, стають доступнішими, потребують мінімальних

¹² Робота виконана під керівництвом професора Юрія ДУДУКАЛОВА

витрат в експлуатації. У зв'язку з цим технологічні процеси 3D-друку для виробництва деталей є перспективними.

Аналіз публікацій

Вважається, що застосуванню ПМ у виробництві деяких машин [3, 4], їх вузлів і деталей не існує альтернативи. У той же час, незважаючи на бурхливий розвиток зазначених технологій, актуальною проблемою залишається недостатня міцність виробів, що одержані шляхом 3D-друку [5, 6]. Це стримує їх застосування в виробництві та ремонті технічних систем, не дає можливості реалізувати їх потенційні можливості. Перспективним рішенням даної проблеми є модифікування ПМ, а також армованого ПМ шляхом додаткових електрофізичних впливів, наприклад, в високочастотним електромагнітним імпульсним полем (ВЕІП). Такі рішення є багатоваріантними, потребують врахування багатьох факторів.

Застосування аналітичних формалізованих методів обґрунтованого вибору ПМ і способу їх модифікування для конструкційних елементів в адитивних технологіях підвищує достовірність і надійність одержаних результатів. Для обґрунтованого вибору потрібно враховувати широку сукупність критеріїв. Оскільки оцінки властивостей матеріалів для конструкційних елементів, вплив способу модифікування можуть мати кількісні та якісні характеристики, то найбільш доцільно для аналітичного формалізованого обґрунтування використовувати експертні методи, які передбачають ранжування об'єктів за сукупністю параметрів.

До багатокритеріальних методів прийняття рішень відносять SWOT-аналіз і методи аналізу ієрархій. В нашому випадку SWOT-аналіз представляє собою узагальнену оцінку технологічного середовища [7], в якому функціонує машинобудівне чи машиноремонтне підприємство. Ця модель матричного аналізу допомагає виділити перешкоди, що постають перед впровадженням технологій 3D-друку. На основі таких досліджень приймаються рішення, в яких акцент робиться на визначенні проблем організаційно-технологічного характеру.

Таким чином, вирішення питань обґрунтування вибору полімерних матеріалів і способу модифікування для зміцнення в технологіях 3D-друку деталей машин, являє собою актуальну задачу наукового та практичного плану.

Мета та завдання роботи

Мета дослідження – виконати обґрунтований вибір оптимальних параметрів для процесу FDM-друку з модифікуванням матеріалу ВЕІП.

Обґрунтований вибір передбачає застосування формалізованого підходу на основі методу аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки різних факторів.

Матеріал і методи дослідження

Для підготовки методики багатокритеріального вибору полімерних матеріалів і способів їх модифікування був задіяний підхід, в основу якого покладена ідея методу аналізу ієрархій, що запропонована Томасом Сааті [8]. В цьому методі використовується процедура попарного порівняння елементів, а для полегшення суджень експертів про важливість об'єктів

використовується спеціальна 9-бальна шкала відносної важливості двох об'єктів, що порівнюються. Метод аналізу ієрархій пройшов всебічну апробацію від рішення проблем національного розвитку країн до приватних задач та отримав високу оцінку фахівців.

Результати дослідження

Для реалізації всього комплексу властивостей полімерних матеріалів необхідно забезпечити міцну взаємодію матриці та наповнювача по всій площі їх контакту. Властивості матеріалу на кордоні розділу матриця-наповнювач істотно відрізняються від властивостей кожного з цих компонентів. Досить часто, цей міжфазовий шар є найбільш слабким місцем, і саме по цій межі починається руйнування матеріалу.

В ході експериментальних досліджень нами доведено, що обробка височастотним електромагнітним імпульсним полем (при частоті – $f = 2,25$ МГц і напруженості – $H = 1265$ А/м) приводить до поліпшення когезійних властивостей. Встановлено тривалість обробки височастотним полем АБС-пластиків, наповнених частками сталі 45, до 10 хвилин. За такого режиму модифікування спостерігали підвищення модуля пружності з $E = 3,5$ ГПа (для вихідного матеріалу) до $E = 3,9...4,20$ ГПа (після модифікування). Аналогічно, руйнівні напруження при згинанні збільшуються від $\sigma_{zg} = 45$ МПа (для вихідного матеріалу) до $\sigma_{zg} = 52...56$ МПа (після модифікування).

Для обґрунтованого вибору полімерного матеріалу, способу модифікування потрібно враховувати широку сукупність критеріїв. В якості таких критеріїв можуть прийматися технічні параметри, експлуатаційні, економічні показники та інші характеристики, що відображають кількісні та якісні результати виготовлення зміцнених конструкцій за якими проводять порівняння.

На основі аналізу наукових і виробничих даних, результатів експериментальних досліджень розроблено наступний набір основних критеріїв для обґрунтування вибору в конкретній ситуації застосування адитивних технологій на базі використання 3D-принтерів в якості технологічного обладнання:

- оцінка сукупної продуктивності праці, яку забезпечує використання процесу 3D-друку з модифікуванням ПМ;
- швидкість витікання ПМ, враховуючи спосіб модифікування та молекулярну масу полімерного матеріалу;
- витрати часу для реалізації способу модифікування ПМ, враховуючи всі стадії модифікування ПМ;
- можливість фінішної обробки (фарбування, підгонка, фіксація деталей) після модифікування ПМ;
- можливість суміщення процесів модифікування ПМ і 3D-друку для підвищення продуктивності;
- міцність самого ПМ з наповнювачем і пошарового скріплення в структурі проходів, реалізація способу модифікування ПМ;
- міцність фіксації виробу за допомогою адгезії на столі 3D-принтеру під час друку;
- екологічні властивості, безпека використання способу модифікування ПМ;
- вартість ПМ для друку на 3D-принтері;
- сукупна вартість технологічного обладнання для друку на 3D-принтері, необхідність додаткових капітальних вкладень у виробництво.

Оцінка важливості критеріїв за методом аналізу ієрархій здійснюється шляхом їх попарних порівнянь. При порівнянні двох критеріїв використовується шкала відносної важливості. Заповнення матриці виконується по рядкам, порівнюючи елемент, розташований в рядку, з елементом, розташований у стовпці.

При проведенні попарних порівнянь двох елементів матриці для двох критеріїв ставляться наступні питання:

- який з критеріїв має більший вплив на прийняття рішення про вибір технології;
- яка перевага одного критерію над іншим з позицій запропонованої шкали оцінок.

При визначенні вектору пріоритетів та оцінюванні узгодженості результатів, визначають пріоритети, які представляють відносну важливість або перевагу елементів на кожному рівні ієрархічної моделі. Для підвищення об'єктивності отриманих результатів заповнення матриці може здійснювати шляхом колективного обговорення списку критеріїв і результатів парного порівняння елементів матриці.

Зразки для випробувань із АВС-пластику були виконані на 3D-принтері моделі Ender 3Pro соплом 0,3 мм з одним периметром і різними коефіцієнтами заповнення.

Для аналізу були вибрані наступні технології 3D-друку з модифікуванням ВЕП, що визначають параметри для їх оптимізації:

Технологія 1: ВЕП на протязі 1 хвилини для АВС-пластику без наповнювача, 100 % коефіцієнт заповнення, без проблем з прилипанням до столу;

Технологія 2: ВЕП на протязі 10 хвилини для АВС-пластику без наповнювача, 100 % коефіцієнт заповнення, без проблем з прилипанням до столу та деформацією виробу;

Технологія 3: ВЕП на протязі 10 хвилини для АВС-пластику з наповнювачем частками сталі 45, 50 % коефіцієнт заповнення, без проблем з прилипанням до столу та деформацією виробу;

Технологія 4: ВЕП на протязі 10 хвилин для АВС-пластику з наповнювачем частками сталі 45, 75 % коефіцієнт заповнення, без проблем з прилипанням до столу та деформацією виробу;

Технологія 5: ВЕП на протязі 5 хвилин для АВС-пластику з наповнювачем частками сталі 45, 50 % коефіцієнт заповнення, без проблем з прилипанням до столу та деформацією виробу.

Використовується шкала оцінювання для способів модифікування за критеріями, враховуються експериментальні дані, пропозиції виробників і досвід фактичного застосування.

Виконуються розрахунки оцінок власних векторів оцінок критеріїв, проводиться їх нормалізація.

Результати розрахунків узагальнених пріоритетів варіантів технологій з вказаними способами модифікування наведені на діаграмі (рис. 1).

На заключному етапі обчислювався індекс узгодженості:

$$IY = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}, \quad (1)$$

де $\lambda_{\max}$ – найбільше власне значення матриці суджень;
 m – число порівнюваних критеріїв.



Рисунок 1 – Результати розрахунку узагальненої оцінки вектору пріоритетів

Також розраховувалось відношення узгодженості. Для цього індекс узгодженості IY потрібно розділити на середнє значення випадкової узгодженості матриці такого ж порядку CC_n :

$$OC = \frac{IY}{CC_n} \cdot 100 \% \quad (2)$$

де CC_n – випадкова узгодженість, яка приймалась по таблиці для матриці порядку n .

Висновки

1. Результати досліджень дають змогу виконати обґрунтований вибір оптимальних параметрів для процесу FDM-друку з модифікуванням матеріалу ВЕПІ в конкретних виробничих умовах. Результати розрахунків свідчать про ефективність запропонованих варіантів модифікування полімерних матеріалів в технологіях 3D-друку та обґрунтованість прийнятих рішень.

2. Розроблена методика обґрунтованого вибору оптимальних параметрів для процесу 3D-друку з модифікуванням матеріалу ВЕПІ на основі процедури методу аналізу ієрархій створює умови для ефективного застосування FDM-технологій друку деталей в машинобудівному та ремонтному виробництві.

Список використаних джерел

1. Дудукалов Ю. В. Формування способів підвищення ефективності застосування 3D-принтерів для комбінованого FDM-друку з модифікацією полімерних матеріалів / Ю. В. Дудукалов, В. Ф. Сорокін, М. Е. Тернюк, О. Б. Ківіренко. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології* : Зб. ХАІ, № 98, 2023. С. 99–113.

2. Поліщук О. С., Зозуля П. Ф., Поліщук А. О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. № 6. С. 51–59.

3. Holmes L. R., Riddick J. C. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure. *JOM*. 2014. Vol. 66. Is. 2. P. 270–274.

4. Глушкова Д. Б., Тарабанова В. П., Нестеренко Е. А. Вплив різних видів поверхневої обробки на стан поверхні тертя. *Дні науки 2012* : Матеріали 8-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Прага, 2012. Т. 89. С. 53–58.
5. 3D Filaments. URL: <https://treedfilaments.com/3d-printing-filaments/>.
6. Антонов Ф. 3D-печать композитів: тренди, перспективи, застосування [Електронний ресурс]. URL: <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additive-tehnologii-luchshie-praktiki/>.
7. Мех О. А. Можливості вдосконалення методики SWOT-аналізу. *Наука та наукознавство*. 2012. № 1. С. 21–26.
8. Сааті Т., Кевін К. Аналітичне планування. Організація систем. (перекл. з англ. Вачнадзе Р. Г., під ред. Ушакова І. А.). 1991. 224 с.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З МАРГАНЦЕВИСТОЇ СТАЛІ ¹³

Діана ПОНОМАРЕНКО, здобувачка вищої освіти групи ДІТ-ПОМ22
Навчально-науковий інститут «Українська-інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Анотація. *Розвиток техніки пов'язано із створенням та освоєнням технології обробки заготовок із сталей і сплавів з особливими фізико-механічними властивостями, найважливішими з яких є корозійна стійкість у різних середовищах, жароміцність і висока міцність. Однак при обробці заготовок з жароміцних і високоміцних сталей і сплавів необхідно знижувати швидкість різання, оскільки погіршується їх оброблюваність. При обробці заготовок з жароміцних сталей виникають сили різання, в 1,2-1,5 рази, а при обробці деталей з деформованих жароміцних сплавів – в 2 рази більші, ніж при обробці заготовок із сталі 44. Марганцевиста сталь – особливий сплав сталі, що включає приблизно 13 % марганцю (точніше, в діапазоні від 11 до 14 %). Однією з технологій, яка дозволяє у повному обсязі задовольнити усі наші потреби є високошвидкісна обробка (ВШО).*

Ключові слова: *сталь, ВШФ, КІТ-системи, 3D проєктування, метод кінцевих елементів, режими фрезерування.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROCESSING PARTS FROM MANGANESE STEEL

Diana PONOMARENKO, student of group ДІТ-ПОМ22
Educational and Scientific Institute «Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy»
of V. N. Karazin Kharkiv National University

Abstract. *The development of technology is connected with the creation and mastering of the technology of processing blanks from steels and alloys with special physical and mechanical properties, the most important of which are corrosion resistance in various environments, heat resistance and high strength. However, when processing workpieces made of heat-resistant and high-strength steels and alloys, it is necessary to reduce the cutting speed, as their machinability deteriorates. When processing workpieces from heat-resistant steels, cutting forces occur 1.2-1.5 times, and when processing parts from deformed heat-resistant alloys – 2 times greater than when processing workpieces from steel 44. Manganese steel is a special alloy of steel, which includes approximately 13 % manganese (more precisely, in the range from 11 to 14 %). One of the technologies that allow us to fully satisfy all our needs is a high-speed processing (HSP).*

Keywords: *steel, VSHF, KIT systems, 3D design, finite element method, milling modes.*

¹³ Робота виконана під керівництвом доцента Юрія СИЧОВА, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти Кирила ВАРОВОДА

Актуальність

Розвиток і впровадження новітніх технологій у виробництво завжди є актуальним питанням. Однією з таких технологій є високошвидкісна обробка. Дослідження фізичних явищ, що супроводжують процес високошвидкісної обробки, є актуальним завданням сучасного машинобудування.

Мета роботи

Підвищення ефективності механічної обробки деталей з марганцевистої сталі за рахунок застосування методу високошвидкісного фрезерування.

Викладення основного матеріалу

1. Марганцевиста сталь – особливий сплав сталі, що включає приблизно 13 % марганцю (точніше, в діапазоні від 11 до 14 %) [2]. Додавання марганцю в сталь надає їй безліч унікальних властивостей, таких як стійкість до магнетизму, стійкість до стирання, більшу міцність і твердість поверхні без підвищення крихкості.

Основний недолік марганцевистої сталі – труднощі обробки на верстаті. Другий недолік полягає у виникненні у даного типу сталі явища відпускнуї крихкості. Однак внаслідок великих запасів марганцевистих руд, дешевизні та доступності цього легувального елемента марганцевиста сталь широко застосовується в машинобудуванні, причому є досить значні перспективи подальшого її розповсюдження.

При обробці заготовок з високоміцних сталей виникають сили різання, в 2-3 рази більші, ніж при обробці заготовок із сталі 45. Великі сили різання, що виникають при обробці заготовок з важкооброблюваних сталей і сплавів, обумовлюють виділення більшої кількості теплоти в зрізаному шарі металу. До того ж більшість важкооброблюваних сталей і сплавів має низьку теплопровідність, що призводить до виникнення високих температур в зоні різання – в 2-3 рази більших, ніж при обробці звичайних конструкційних матеріалів.

При обробці заготовок зі сплавів на титановій основі усадка стружки мала та за певних умов відбувається не усадка, а подовження стружки. Причиною малої усадки стружки при різанні заготовок із сплавів на титановій основі є їх низька пластичність. Мала усадка обумовлює малу площу контакту стружки з передньою поверхнею інструменту та велику швидкість переміщення стружки по передній поверхні, що викликає високі контактні тиски та температури. Через великі сили, що виникають при різанні важкооброблюваних сталей і сплавів, необхідно, щоб жорсткість системи верстат – пристосування – інструмент – заготовка (ВПЗ) була великою. Підвищення контактних температур є основною причиною низької стійкості інструменту, та щоб уникнути їх збільшення обробляти важкооброблювані матеріали слід при малих швидкостях різання.

2. Режими обробки марганцевистої сталі. Незважаючи на те, що марганцевиста сталь, як конструкційний матеріал відома давно, багато її якостей, які проявляються як у процесі виробництва, так і при експлуатації виливків з неї, потребують всебічного вивчення, уточнення та науковому поясненні [1, 2]. Однією з головних причин, яка обмежує використання марганцевистих сталей для виготовлення деталей машин, механізмів та обладнання є надзвичайно утруднена її обробка різанням. Сталь настільки в'язка та схильна

під дією сили різання P_z до утворення наклепу в точках контакту різця, що вважалася практично не придатною для обробки ріжучим інструментом.

На підприємствах використовують традиційний спосіб обробки виливок зі сталі 110М13Л – токарну та фрезерну обробку різцями що напаяні та змінними пластинами (у разі фрезерування) з твердосплавними пластинами ВК8 (група вольфрамових сплавів). Хімічний склад сплаву ВК8: 92 % карбіду вольфраму та 8 % кобальту. Через схильність сталі 110М13Л до наклепу режими різання дуже низькі. Наприклад, при токарно-карусельній обробці броні конусних дробарок Ø2200 мм на верстаті мод. 1540 режими різання такі: число оборотів заготовки $n = 0,5-1$ об/хв.; подача на 1 оборот $S = 1,5-2$ мм/об.; швидкість різання $V = 6-8$ м/хв.; глибина різання $t = 2-6$ мм.

Для порівняння швидкість різання при обробці деталей вуглецевих сталей $V = 60-200$ м/хв. Крім того, через високі зусилля різання відбувається передчасний знос устаткування.

Застосування процесу ПМО при обробці марганцевистих сталей типу 110Г13Л дозволяє в 8-10 разів підвищити продуктивність процесу при зниженні в 2 рази витрат на твердосплавний інструмент.

Недоліком плазмової обробки є супровід процесу різання сильним світловим випромінюванням, значним шумом, виділенням шкідливих металевих парів.

З метою подальшого підвищення продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки деталей з марганцевистих сталей освоєна високошвидкісна чистова обробка різцями з механічним кріпленням змінних пластин з кубічного нітриду бору (КНБ).

Результати досліджень на підприємствах і досвід роботи інструментом з КНБ виявили таку закономірність – чим вище твердість оброблюваного матеріалу, тим істотніше виявляються переваги по зносостійкості та ріжучим якостям різців з полікристалів КНБ. Лезовий інструмент з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі нітриду бору ВКН здатний замінити дефіцитний вольфрамововмістний твердий сплав на операціях чорнової, напівчистої та чистої обробки марганцевистих сплавів, забезпечуючи високу якість і продуктивність обробки за рахунок використання високих швидкостей різання.

При досить жорсткій системі ВПД інструментом з КНБ можна отримати такі параметри оброблюваної поверхні: шорсткість 1,25-0,08 мкм; овальність 0,002 мм; конусність < 0,002 мм.

Результати випробувань різноманітних надтвердих матеріалів дають підставу зробити висновок про те, що інструменти, оснащені полікристалами на основі синтетичних алмазів і нітриду бору, майже не конкурують один з іншим – кожен має свою область використання, яка визначається умовами різання, фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу та фізико-механічними властивостями інструментального матеріалу. По твердості синтетичний алмаз має незначні переваги над КНБ, але істотно поступається йому по теплостійкості (600-700°C і 1100-1300°C відповідно).

Дослідження показали, що при точінні броні зі сталі 110М13Л інструментом з КНБ зусилля різання майже на порядок нижче, ніж при обробці різцями ВК8, що збільшує термін служби верстатів.

Недоліком для широкого впровадження різців з пластинами з КНБ є наявність ливарних раковин при чорновій обробці по шкірці та недостатня жорсткість верстатів – різці викришуються та для подальшої переточки та роботи непридатні. Результати досліджень, проведених на токарно-карусельних верстаті мод. 1540, зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Режими різання при різних методах токарної обробки сталі 110Г13Л

Режими різання	Напаяний різець с пластинами BK8	Напаяний різець BK8 с плазмовим підігрівом	Збірний різець зі змінною пластиною із КНБ
Швидкість різання V , м/хв	6-8	12-16	70-120
Число обертів заготовки n , об/хв.	0,5-1	1,5-2	10-18
Подача на 1 оберт S , мм/об.	1,5-2	2-3	0,4-0,6
Глибина різання t , мм	2-6	4-8	3-6
Основний час T_0 , год	31	23	9,3
Стійкість ріжучої кромки T , хв	45-50	50-60	100-120

На основі аналізу всіх існуючих методів і проведених досліджень необхідно обґрунтувати режими різання при обробці поверхонь деталей з марганцевистих сталей. Очевидно, що вибір методу обробки марганцевистої сталі залежить від умов і можливостей виробництва. Найбільший інтерес для подальшого дослідження має питання стійкості різального інструменту, яка впливає на термін експлуатації інструменту та на собівартість виготовлення деталей.

Висновки

Таким чином ми маємо можливість зробити висновки, що марганцевиста сталь має наступні переваги, над звичайною сталлю:

- стійкість до магнетизму;
- стійкість до стирання;
- більшу міцність і твердість поверхні без підвищення крихкості.

Висока міцність є благом в багатьох галузях промисловості для широкого спектру виробів, таких як бетономішалки, каменедробарки, гусеничні траки, залізничні стрілки, і т.д.

Однак основний недолік марганцевистої сталі – труднощі обробки на верстаті. Для цього було розглянуто два важкі верстати, функції та характеристики яких дозволяють обробляти задані деталі. Другий недолік полягає у виникненні у даного типу сталі явища відпускнуї крихкості.

Однією з технологій, яка дозволяє у повному обсязі задовольнити усі наші потреби є високошвидкісна обробка (ВШО). Основними відмінностями ВШО від традиційної механічної обробки, з фізичної точки зору, є переважання швидкоплинних динамічних процесів, як в зоні різання, так і в пружній системі верстата, та яскраво виражено нелінійні закони розвитку цих процесів. Завдяки даному виду обробки мається можливість досягти значної продуктивності, при цьому не втрачаючи якість вихідної продукції.

Список використаної літератури

1. Степанов А. М. Високошвидкісне фрезерування в сучасному виробництві. *CAD/CAM/CAE*. 2003. № 4 (13).
2. Петраков Ю. В. Modern trends of cam system for machining on CNC machines. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія *Машинобудування*. 2013. №. 2 (68). Р. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2013.68.33978>.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ ТОЧІННЯ¹⁴

**Олександр ВЛАСЕНКО, здобувач вищої освіти групи ДІТ-ПОМ22
Навчально-науковий інститут «Українська-інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна**

***Анотація.** Підвищення вимог до точності розмірів і форми деталей, що обробляються на металорізальних верстатах, поява нових важкообробних матеріалів, а також широке впровадження автоматизації технологічних процесів та створення автоматичних верстатів із системами керування та регулювання викликало різке збільшення ролі динамічних процесів у верстатах. При проєктуванні, виготовленні та експлуатації верстатів все частіше виникає необхідність розв'язання задач, пов'язаних з динамікою явищ. Насамперед це стосується забезпечення умов стійкого руху інструменту та заготовки, тобто відсутності так званих вібрацій, «підривання», «заклинювання» або стрибкоподібного переміщення вузлів верстата.*

***Ключові слова:** вібрації, коливання, автоколивання, інструмент, лезо, динамічний стан, технологічна система.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF TURNING OPERATION

**Oleksandr VLASENKO, student of group DIT-POM22
Educational and Scientific Institute «Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy»
of V. N. Karazin Kharkiv National University**

***Abstract.** Increasing requirements for the accuracy of the size and shape of parts processed on metal cutting machines, the emergence of new difficult-to-machine materials, as well as the widespread introduction of automation of technological processes and the creation of automatic machines with control and regulation systems caused a sharp increase in the role of dynamic processes in machine tools. During the design, manufacture and operation of machine tools, the need to solve problems related to the dynamics of phenomena is becoming more and more frequent. First of all, this concerns ensuring the conditions for stable movement of the tool and the workpiece, that is, the absence of so-called vibrations, «undermining», «jamming» or jerky movement of the machine nodes.*

***Keywords:** vibrations, oscillations, self-oscillation, tool, blade, dynamic state, technological system.*

Актуальність

Наявні роботи та дослідження, присвячені вивченню окремих показників динамічної якості верстатів, не узагальнюють параметри, якими можна судити про доцільність того чи

¹⁴ Робота виконана під керівництвом доцента Юрія СИЧОВА, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти Олександра БРИНЮКА

іншого конструктивного чи технологічного рішення по всьому комплексу показників динамічної якості верстата.

Мета роботи

Дослідження зносостійкості різального інструменту в процесах точіння та фрезерування на основі досліджень закономірностей динамічного стану технічної системи.

Викладання основного матеріалу

1. Основні підходи до моделювання динаміки технологічної системи.

Динамічні властивості технологічної системи визначаються взаємодією елементів пружної системи «верстат – пристосування – інструмент – деталь» (ВППД) з робочими процесами, що протікають при різанні матеріалів: силовими та тепловими взаємодіями між заготовкою, інструментом та елементами верстата, електромагнітними, гідравлічними та іншими процесами в елементах верстатної системи. Тому щодо динаміки технологічної системи необхідно враховувати таке [3]:

- завдання дослідження динаміки технологічної системи є комплексним фізичним завданням;

- динамічні параметри технологічної системи змінюються в широкому діапазоні та, при моделюванні, а ще більшою мірою при оптимізації процесів різання, необхідно чітко визначати межі варіювання цих параметрів стосовно конкретних видів обробки та верстатного обладнання.

Метою дослідження динаміки технологічної системи є підвищення її динамічних та експлуатаційних якостей.

У складній динамічній системі, що складається з механічних, гідравлічних та інших елементів, систему розчленовують на елементарні ланки, з'єднані між собою зв'язками. Кожна ланка передає вплив лише в одному напрямку – з входу на вихід. Ланки відрізняються динамічними властивостями, які визначаються їх диференціальними рівняннями. Динамічні властивості всієї системи описуються сукупністю рівнянь елементів системи та рівнянь зв'язків, що визначають порядок з'єднання елементів. Ці рівняння і є математична модель динамічної системи.

2. Дослідження динаміки технологічної системи при точінні та фрезеруванні.

При математичному моделюванні окремих підсистем при циркуляційному навантаженні запропоновано виконувати аналіз впливу співвідношень параметрів жорсткості елементів обробної системи на деформацію підсистеми «інструмент – оброблювана деталь», що дозволило визначити траєкторії взаємного переміщення інструменту та деталі та встановити ступінь впливу динамічного стану системи на точність і шорсткість обробленої поверхні.

Маса, жорсткість і демпфуючі властивості вузлів технологічних систем, що моделюються, позначаються на схемах моделей, відповідно, через m , k , c . Ці параметри характеризують парціальні коливання кожного з вузлів технологічної системи, що моделюються, в напрямку, перпендикулярному головним для вузла моделюється осям жорсткості та демпфування. Узагальнена координата визначає просторово орієнтовані коливання центру мас кожного з i -тих моделювальних елементів технологічної системи.

ретворення за допомогою методу комплексних амплітуд шляхом підстановки

ентру мас модельован

Схема моделі наведено на рис. 2 а її параметри в табл. 1. Коливання моделі описувалися за допомогою семи дифузів (1.1). У цьому розглядалися коливання наступних елементів технологічної системи: леза інструмента (m_1, k_1, c_1); державки різця (m_2, k_2, c_2); супорта (m_3, k_3, c_3); різцетримача (револьверної головки) (m_6, k_6, c_6); станини верстата з передньою та задньою бабками (m_4, k_4, c_4); шпинделя разом з патроном і оброблюваною заготовкою (m_5, k_5, c_5).



Таблиця 1 – Параметри динамічної моделі технологічної системи токарного верстата

Динамічні параметри	Модульований вузол технологічної системи (№ маси)					
	Лезо (1)	Державка різця (2)	Супорт (3)	Станина (4)	Шпиндель з патроном та заготовкою (5)	Різець-тримач (6)
Маса m_i , кг	$0,29 \cdot 10^{-6}$	0,12	37	3693	29	20
Жорсткість k_i , Н/м (f_i , Гц)	$1,96 \cdot 10^8$ ($4,2 \cdot 10^6$)	$7,75 \cdot 10^{10}$ ($1,28 \cdot 10^5$)	$2,73 \cdot 10^9$ (1370)	$2,44 \cdot 10^{12}$ (4083)	$5,47 \cdot 10^{10}$ (6920)	$3,15 \cdot 10^9$ (2000)
Демпфування c , Н/м/с (Добротність Q)	0,5 (20)	2170 (20)	$4,33 \cdot 10^4$ (10)	$3,84 \cdot 10^6$ (25)	$8,45 \cdot 10^4$ (15)	$6,78 \cdot 10^4$ (15)

Примітка: Контактне зусилля $P_{BK} = 10^7$ Н; жорсткість k визначалася за формулою

$$-k_i = m_i(2\pi f_i)^2$$

де f_i – частота власних парціальних коливань модельованого вузла перебувала шляхом ідентифікації; демпфування c_i визначалося за такою формулою

$$c_i = \frac{\sqrt{k_i \cdot m_i}}{Q_i}$$

де Q_i – добротність (величина) піку своїх парціальних коливань модельованого вузла знаходилася шляхом ідентифікації.

Диференціальне рівняння:

$$\begin{aligned}
 1) & m_1 \ddot{\zeta}_1 + c_1(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) + k_1(\zeta_1 - \zeta_2) + c_K(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) + k_K(\zeta_1 - \zeta_5) - m_1 H_c \ddot{\varphi} = \bar{P}_{BK}; \\
 2) & m_2 \ddot{\zeta}_2 + c_1(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) - k_1(\zeta_1 - \zeta_2) + c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_3) + k_2(\zeta_2 - \zeta_3) - m_2 H_c \ddot{\varphi} = 0; \\
 3) & m_3 \ddot{\zeta}_3 + c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_3) - k_2(\zeta_2 - \zeta_3) + c_3(\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) + k_3(\zeta_3 - \zeta_4) - m_3 H_c \ddot{\varphi} = 0; \\
 4) & m_4 \ddot{\zeta}_4 + c_3(\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) - k_3(\zeta_3 - \zeta_4) + c_4(\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + k_4(\zeta_4 - \zeta_5) - m_4 H_c \ddot{\varphi} + \\
 & + \left(\frac{c_4}{2} L_1 - \frac{c_4}{2} L_2\right) \dot{\varphi} + \left(\frac{k_4}{2} L_1 - \frac{k_4}{2} L_2\right) \varphi = 0; \\
 5) & m_5 \ddot{\zeta}_5 - c_K(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) - k_K(\zeta_1 - \zeta_5) - c_4(\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) - k_4(\zeta_4 - \zeta_5) + c_5 \dot{\zeta}_5 + k_5 \zeta_5 + \\
 & + c_6(\dot{\zeta}_5 - \dot{\zeta}_6) + k_6(\zeta_5 - \zeta_6) + \left(\frac{c_4}{2} L_1 - \frac{c_4}{2} L_2\right) \dot{\varphi} + \left(\frac{k_4}{2} L_1 - \frac{k_4}{2} L_2\right) \varphi = 0; \\
 6) & m_6 \ddot{\zeta}_6 - c_6(\dot{\zeta}_5 - \dot{\zeta}_6) - k_6(\zeta_5 - \zeta_6) - m_6 H_c \ddot{\varphi} = -\bar{P}_{BK}; \\
 7) & J \ddot{\varphi} + \left(\frac{c_4}{2} L_1^2 + \frac{c_4}{2} L_2^2\right) \dot{\varphi} + \left(\frac{k_4}{2} L_1^2 + \frac{k_4}{2} L_2^2\right) \varphi - m_1 H_c \ddot{\zeta}_1 - m_2 H_c \ddot{\zeta}_2 - m_3 H_c \ddot{\zeta}_3 - \\
 & - m_4 H_c \ddot{\zeta}_4 + \left(\frac{c_4}{2} L_1 - \frac{c_4}{2} L_2\right) (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + \left(\frac{k_4}{2} L_1 - \frac{k_4}{2} L_2\right) (\zeta_4 - \zeta_5) = 0.
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Висновки

Для реалізації даної моделі в практиці різання процес прогнозування необхідно автоматизувати, використовуючи з цією метою програмовані мікропроцесорні пристрої, програмне забезпечення яких у формалізованому вигляді містить прогнозну модель, число параметрів якої входить шуканий ресурс інструменту.

Список використаної літератури

1. Внуков Ю. М., Залога В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2010. 243 с.
URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/20708>.
2. Залога В. О., Нагорний В. В. Дослідження коливань токарних верстатів. Частина 1. Дослідження закономірностей зміни динаміки обробної системи залежно від стану різального інструменту. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. 2013. № 1. С. 125–136. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/31975>.
3. Залога В. О., Нагорний В. В., Тур А. М. Програмно-апаратний комплекс контролю якості функціонування металообробної технологічної системи. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : Матеріали та програма III Всеукр. міжвуз. науково-техн. конф., м. Суми, 22–25 квітня 2014 р. Суми, 2014. С. 60.
URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/324279459.pdf>.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ЗА РАХУНОК РОЗРОБКИ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ІНСТРУМЕНТУ ¹⁵

Віталій БСЛОКОПИТОВ, здобувач вищої освіти групи ДІТ-ПОМ22
Навчально-науковий інститут «Українська-інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

***Анотація.** Адаптивність (пристосовуваність) керування лезової металообробкою, що виконується на верстатах з ЧПК, забезпечується за рахунок вибору за тими чи іншими алгоритмами оптимальних поєднань трьох керованих параметрів: глибини, подачі та швидкості різання. Оптимум забезпечується шляхом визначення екстремуму цільової функції, що дозволяє досягати на даному верстаті в залежності від розв'язуваного завдання або максимуму продуктивності, або мінімуму собівартості деталі, що отримується при цьому, або підтримки граничного значення регульованих параметрів. Вирішення зазначеної проблеми потребує розробки нової методології прогнозування індивідуального ресурсу інструменту, що склала основу автоматизованої системи адаптивного керування процесом лезової обробки матеріалів.*

***Ключові слова:** вібрації, коливання, автоколивання, інструмент, лезо, динамічний стан, технологічна система.*

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE CUTTING PROCESS DUE TO THE DEVELOPMENT OF A TOOL RESOURCE FORECASTING MODEL

Vitalii BIELOKOPYTOV, student of group ДІТ-ПОМ22
Educational and Scientific Institute «Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy»
of V. N. Karazin Kharkiv National University

***Abstract.** The adaptability (adaptability) of blade metalworking control, which is performed on CNC machines, is ensured due to the selection of optimal combinations of three controlled parameters: depth, feed and cutting speed according to certain algorithms. The optimum is ensured by determining the extremum of the objective function, which allows achieving on a given machine, depending on the task being solved, either the maximum productivity, or the minimum cost of the part obtained at the same time, or maintaining the limit value of the adjustable parameters. The solution to the mentioned problem requires the development of a new methodology for predicting the individual resource of the tool, which formed the basis of an automated system of adaptive control of the process of blade processing of materials.*

***Keywords:** vibrations, oscillations, self-oscillation, tool, blade, dynamic state, technological system.*

¹⁵ Робота виконана під керівництвом доцента Юрія СИЧОВА, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти Ярослава ГРЕЧАНЮКА

Актуальність

Одна з головних причин зниження точності обробки на металорізальних верстатах – зміна розмірів різального інструменту внаслідок його зношування. Актуальність завдання підвищується при обробці матеріалів, що важко обробляються, які широко використовуються в авіаційній промисловості, оскільки для важко обробних матеріалів трудомісткість обробки заготовки порівнянна з ресурсом інструменту.

Мета роботи

Розробка методологічних принципів прогнозування ресурсу механічних систем, здійснюваного в режимі реального часу без переривання процесу функціонування системи.

Викладання основного матеріалу

1. Знос інструменту – один із найважливіших параметрів, який впливає на якість і швидкість обробки деталі. Серед усіх похибок і відмов, які можуть мати місце в процесі обробки, особливо виділяється відмова інструменту та похибки, що вносяться його зносом, що обумовлено підвищеними навантаженнями та роботою виконуваної зношеним інструментом. Як відомо, частку відмов ріжучого інструменту (PI) припадає переважна більшість випадків від загальної кількості відмов обробної системи. Зношування інструменту, який у процесі обробки постійно збільшується аж до його повної непридатності, значною мірою визначає точні показники процесу обробки та якість обробленої поверхні (макро-, мікро- та субмікрогеометрію, фізико-хіміко-механічний стан і залишкові напруги в поверхневому шарі). Якщо зношування різального інструменту по задній поверхні, в принципі, можна розрахувати [1] та при обробці деталей з відносно простими формами поверхонь (плоскими, циліндричними тощо) однолезовим інструментом (різцем) його можна врахувати та в якійсь мірі компенсувати за допомогою вже порівняно непогано розроблених існуючих систем, то при обробці поверхонь складної форми (фасонних) і використанні багатолезових інструментів (фрез, свердлів та ін.), коли процес різання характеризується великим ступенем не стаціонарності та супроводжується змінними значеннями геометрії леза (кінематичних кутів як в основний, так і в головній січній площинах) і параметрів режиму різання (швидкості різання, товщини та ширини зрізу, навіть при постійних значеннях подачі та глибини різання) стан геометрії леза та самої ріжучої кромки інструменту у формуванні вихідних показників процесу різання відіграє значно більшу роль, такі системи практично відсутні. Проблема створення систем для оцінки (контролю) ступеня зносу інструменту та його можливої компенсації при нестаціонарному різанні шляхом коригування або режиму різання або положення інструменту ще недостатньо розроблена, хоча такі роботи і ведуться [2]. Ще однією істотною проблемою при механічній обробці є визначення моменту «зупинки» (діагностика стану різального інструменту) процесу різання з метою заміни інструменту або його ріжучої частини, наприклад, ріжучої кромки багатогранної пластини, що не переточується, при досягненні прийнятим критерієм зносу заданої величини (характеристики).

Отже, під час контролю та діагностики стану ріжучого інструменту необхідно вирішувати такі завдання: контроль працездатності інструменту, тобто, придатний ще

інструмент чи ні (аварійні ситуації); контроль розмірного зношування інструменту; контроль стану різальної кромки, що особливо актуально при чистовій обробці поверхонь та обробці поверхонь складної форми (втрата необхідної геометричної форми інструменту, зміна переднього та заднього кутів тощо), особливо при обробці на верстатах з ЧПК, багатоцільових (обробних центрах) та ін.

2. Системи для контролю ступеня зношування та визначення моменту виходу з ладу інструменту.

На сьогоднішній день розроблено відносно велику кількість систем для контролю ступеня зношування та визначення моменту виходу з ладу інструменту. Ці системи класифікуються за різними показниками (рис. 1), що визначає стратегію діагностування інструментів, наприклад, силі різання, потужності різання та ін.

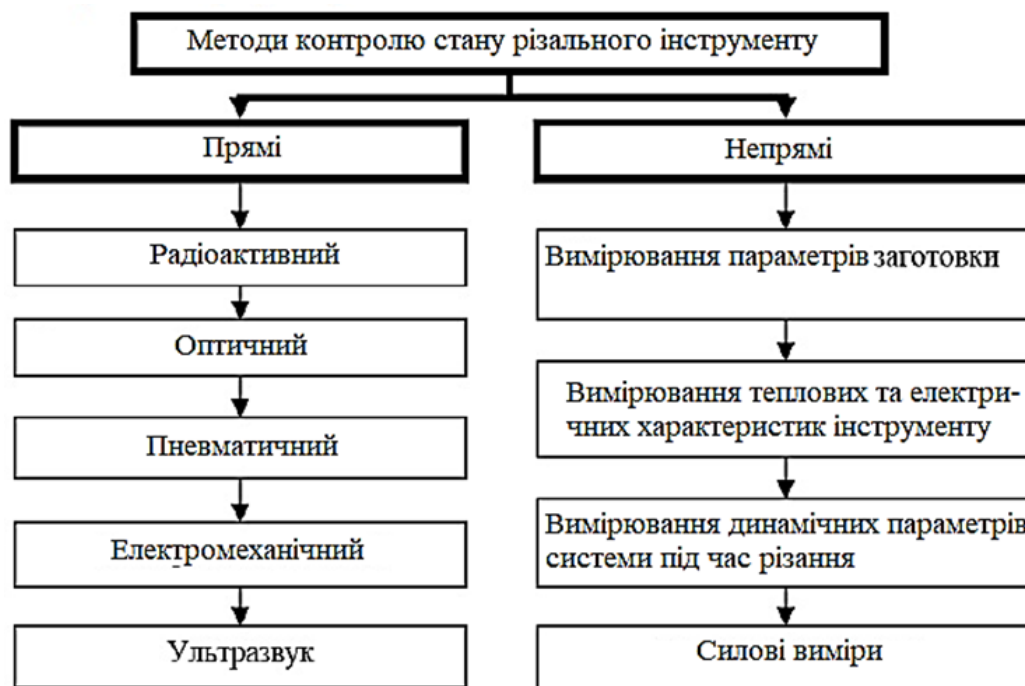


Рисунок 1 – Методи контролю стану РІ

При проектуванні систем активного контролю, заснованих на прямих методах контролю (рис. 1) стану РІ, існують фактори, які знижують ефективність роботи системи. Наприклад, при оптичному способі контролю, складно домогтися «хорошої видимості» ріжучої кромки при впливі ЗОТС і стружки, пневматичний та радіоактивний методи обмежують використання стандартної оснастки без додаткової доробки.

Для інструмента, що обертається, проблема контролю постає більш гостро. Розвиток інструментальних матеріалів і покриттів призводить до значного збільшення швидкості обробки, що дуже ускладнює контроль стану кромки інструменту, та практично унеможливорює процес його безперервного прямого контролю. Уривчасте різання також накладає певні обмеження на вибір принципів діагностування стану ріжучого інструменту.

Найбільш «еластичним» напрямком у контролі різальних інструментів є моніторинг (безперервний контроль) безпосередньо у процесі обробки. Усі методи діагностики поточної працездатності різальних інструментів можна умовно розділити на чотири групи, а їх, у свою чергу, на методи прямого контролю, засновані на безпосередній реєстрації величини

зношування інструменту, та непрямого контролю (рис. 2), що використовують фізичні явища, які супроводжують процеси різання та зношування інструменту.

В результаті виконаного літературно-патентного аналізу вітчизняних і зарубіжних систем моніторингу визначено найбільш надійні та прості методи контролю, що ґрунтуються на аналізі сигналів віброакустичної емісії та сигналів електропровідності контакту «інструмент-деталь».



Рисунок 2 – Непрямі методи контролю стану різального інструменту

Висновки

Новизна методології прогнозування ресурсу інструменту полягає в тому, що вона на відміну від діючих методів, що орієнтуються на середньостатистичні дані про граничне зношування та ресурс інструменту, забезпечує прогнозування в режимі реального часу індивідуального ресурсу інструменту, що відповідає фактичним умовам його навантаження.

Розробка автоматизованої системи адаптивного керування процесом різання, основу якої становить нова методологія прогнозування ресурсу інструменту, є, безсумнівно, актуальним науково-практичним завданням.

Список використаної літератури

1. Основи теорії різання матеріалів : підруч. [для вищ. навч. закл.] / М. П. Мазур та ін. ; ред. М. П. Мазур. 2-ге вид. Львів : Новий світ-2000, 2011. 422 с. URL: <https://xn--e1ajqk.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Mazur-M.-P.-Osnova-teori-rizannya-meterialiv.pdf>.
2. Внуков Ю. М., Залога В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2010. 243 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/20708>.

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ МЕТОДАМИ ЕІЛ ¹⁶

**Ярослав КІРІЄНКО, здобувач вищої освіти групи МС-16т1-24
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Робота присвячена дослідженню впливу електроімпульсної обробки конструкційної сталі на структуру, елементний і фазовий состав, механічні й триботехнічні властивості модифікованого поверхневого шару, а також розробці й оптимізації технологічних режимів ЕІЛ, що забезпечують підвищену зносостійкість оброблюваних деталей. У представленій роботі на основі проведених досліджень встановлено, що товщина формованого покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електрода й енергетичних режимів ЕІЛ.

Ключові слова: сталь, електроімпульсна обробка, зносостійкість, легування.

INCREASING WEAR RESISTANCE AND RESTORATION OF WORN FRICTION SURFACES USING EIL METHODS

**Yaroslav KIRIENKO, student of group MC-16t1-24
Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. The paper is devoted to the study of the effect of electropulse treatment of structural steel on the structure, elements and phase composition, mechanical and tribotechnical properties of the modified surface layer, as well as the development and optimisation of technological modes of EIT that ensure increased wear resistance of the treated parts. In the present work, based on the conducted studies, it was found that the thickness of the formed coating depends on the chemical composition of the alloying electrode material and the energy modes of the EAF.

Key words: steel, electrical discharge machining, wear resistance, alloying.

Вступ

Перспективними методами поверхневого зміцнення та модифікування є методи, засновані на обробці матеріалів концентрованими потоками енергії та речовини (КПЕ). Про унікальний вплив зазначеного впливу на формування структури, мікроструктури, властивостей поверхні, а також згодом на процеси тертя та зношування металів вказується в роботах К. К. Намитокова, Г. В. Самсонова, А. В. Білого, Н. Н. Рикаліна, А. А. Углова, Ю. А. Биковського, Г. І. Бровера, Ю. К. Машкова, Б. Т. Грязнова та ін.

¹⁶ Робота виконана під керівництвом доцента Валерія БАГРОВА

У промисловості залежно від умов експлуатації виробів застосовуються різні методи поверхневого зміцнення сталей і сплавів, такі як поверхнєве пластичне деформування, хіміко-термічна обробка, формування зносостійких покриттів (мікродугове оксидування, напилювання та ін.), високоенергетичні методи (лазерна, іонно-променева обробка та ін.) та різні їхні комбінації. Найбільш перспективними є методи поверхневого модифікування деталей трибосистем із застосуванням висококонцентрованих потоків енергії, до яких ставиться електроімпульсна обробка (ЕІЛ), що дозволяє одержувати покриття з високими фізико-механічними та триботехнічними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Усі відомі на сьогоднішній день методи зміцнення поверхонь можна розбити на п'ять основних груп залежно від технологічного приймання зміни поверхневих або об'ємних властивостей матеріалу:

- 1) утворіння тонких плівок на поверхні;
- 2) високоенергетичні методи, пов'язані зі зміною хімічного складу та структури поверхневого шару;
- 3) механічний вплив на поверхню;
- 4) об'ємна та поверхнева зміна структури та властивостей термообробкою;
- 5) комбіновані методи.

При зміцненні шляхом створення поверхневих плівок, структура внутрішніх шарів матеріалів залишається незмінною. Зміцнення здійснюється формуванням покриття за рахунок хімічних і дифузійних реакцій між елементами парогазових сумішей і матеріалу виробу. Покриття можуть утворюватися газополум'яним, плазмовим, детонаційним та іншими відомими видами напилювання. При цьому триботехнічні властивості тіл визначаються багато в чому структурою та хімічним складом поверхневих плівок.

Широкі перспективи відкриває технологічне забезпечення зносостійкості металевих поверхонь на основі електрофізичних способів зміцнення з використанням високоенергетичних концентрованих потоків енергії (КПЕ).

Серед методів поверхневого зміцнення з використанням концентрованого потоку енергії та речовини гідне місце займають лазерні технології [1, 2].

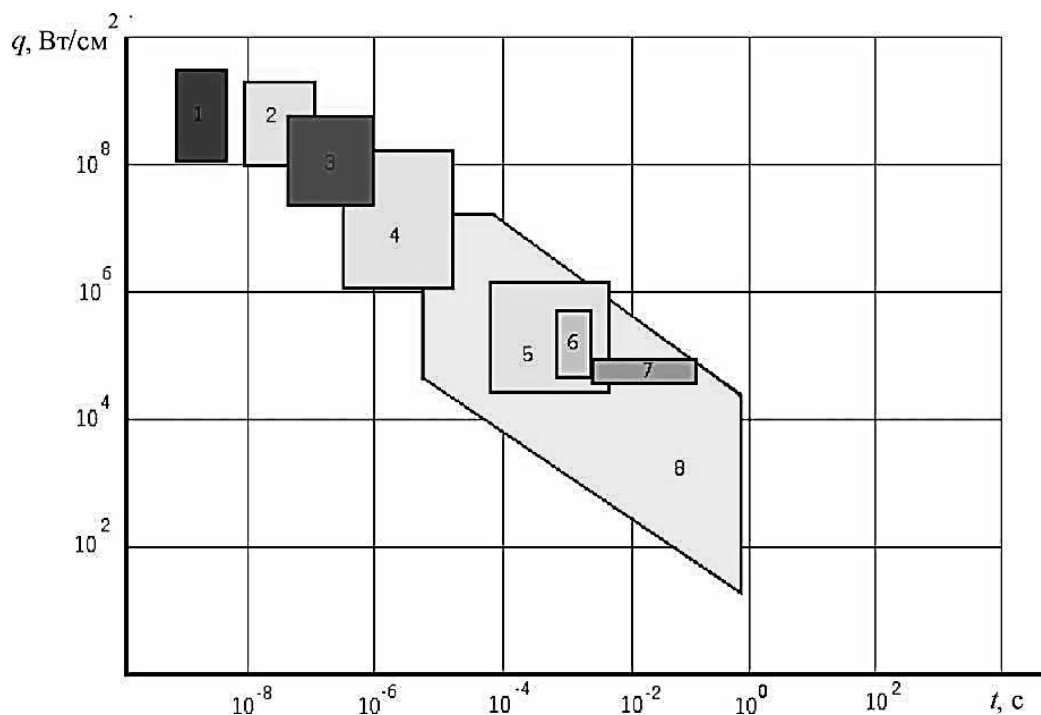
У процесі лазерного легування розплавляється ділянка поверхні металу разом з легуючими елементами, що додаються, попередньо нанесеними на оброблювану ділянку, що дозволяє в локальному обсязі одержати новий сплав з необхідними експлуатаційними властивостями [3, 4].

Електроерозійний синтез (ЕЕС) покриттів – технологія нанесення зносостійких надтвердих покриттів, заснована на взаємодії спеціальної екзотермічної суміші з основним металом під дією електричної іскри з утвором сплавів впровадження. Процес електроерозійного зміцнення металевих виробів у середовищі рідкого азоту дозволяє змінювати властивості поверхневого шару деталей без нанесення на поверхню зміцнюючого матеріалу.

Відомо, що іонно-променева обробка, іонна імплантація, іонне перемішування та модифікування поверхневих шарів за допомогою потужних іонних пучків дозволяють змінити коефіцієнт тертя, збільшити корозійну стійкість і зносостійкість металів [6].

Проаналізувавши використовувані методи зміцнення можна зробити висновки, що не існує універсального методу, що приводить до формування необхідних експлуатаційних властивостей. Кожний метод характеризується своєю оптимальною областю застосування та своїм діапазоном прикладених до зміцнених поверхонь експлуатаційних температурно-навантажувальних параметрів.

Розглянувши різноманіття зміцнюючих впливів, процеси обробки матеріалів можна об'єктивно оцінити двома параметрами: щільністю енергетичного потоку та часом його взаємодії з матеріалом. Це дозволяє різні технологічні приймання зміцнення відобразити на площині в координатах «щільність енергетичного потоку – час взаємодії» (рис. 1), де виділені зони, характерні для окремих технологій зміцнення [3–5].



- 1 – електронно-променева обробка; 2 – лазерне шокове зміцнення;
 3 – електроімпульсне легування; 4 – лазерна поверхнева аморфізація; 5 – лазерна термообробка; 6 – алмазне вигладжування; 7 – поверхнево-пластичне деформування;
 8 – термообробка

Рисунок 1 – Діапазони щільностей енергетичних потоків і часу взаємодії при різних методах зміцнення

У цьому зв'язку одним з перспективних напрямків в області зміцнення інструментів і деталей машин є спосіб електроіскрового легування (ЕІЛ), що утворює одну із самих тонких поверхневих модифікацій, що володіє високими показниками щільності енергетичного потоку за короткий час впливу, що й дозволяє створювати поверхневі структури з особливими властивостями.

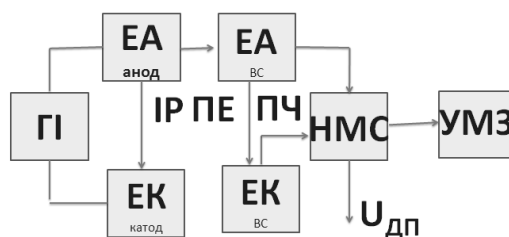
Мета дослідження

Встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталі методом електроімпульсної обробки, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя машин.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес утворення концентрованого потоку електронів при електричному розряді та його взаємодії зі сталеву основою можна представити у вигляді структурної схеми термодинамічних процесів у системі «легуючий електрод (анод) – оброблювана деталь (катод)» (рис. 2).

При зближенні легуючого електрода з поверхнею оброблюваної деталі напруженість електричного поля зростає, між ними виникає іскровий електричний розряд (ІР). Потік електронів (ПЕ) спрямовується до поверхні катода (ЕК). Кінетична енергія загальмованих електронів акумулюється в поверхневих шарах анода, переводячи його в збуджений стан (ЕАВС). Щільність потоку зростає, перевершуючи критичне значення, при якому метал анода плавиться, з нього виділяється потік дрібних часток (ПЧ), що направляється до поверхні катода. Частки нагріваються, закипають, «вибухають», і, досягаючи поверхні катода, утворюють сильні адгезійні зв'язки та частково дифундують на незначну глибину, модифікуючи тонкий поверхневий шар. Слідом за частками рухається анод і через частки, пов'язані з поверхнею катода, проходить другий імпульс струму, що супроводжується механічним ударом прискореної маси анода. При механічному контакті електродів у зоні взаємодії розбудовуються дифузійні процеси переносу мікрочастинок на катод, хімічні реакції між частками електрода-анода та структурними елементами матеріалу катода та формування нестійкої модифікованої структури (НМС). У такому режимі роботи системи «анод – катод» на поверхні катода внаслідок дисипативних процесів формується тонкий шар покриття стійкої модифікованої структури (УМЗ).



ГІ – генератор імпульсів; ЕА – анод у вихідному стані; ЕК – катод у вихідному стані;

ІР – іскровий розряд; ПЕ – потік електронів; ПЧ – потік часток; ЕАВС – анод у збудженому стані; ЕКВС – катод у збудженому стані; НМС – нестійка модифікована структура; УМЗ – стійка модифікована структура

Рисунок 2 – Структурна схема термодинамічних процесів при ЕІО

Наведені результати експериментального дослідження впливу матеріалу та режимів ЕІЛ на товщину та мікротвердість покриттів. З діаграм (рис. 3) видно, що з підвищенням енергетичних режимів ЕІЛ: напруги від 80 В до 160 В та ємності від 34 мкФ до 240 мкФ товщина покриттів збільшується при будь-якому матеріалі ЛЕ.

При цьому, при обробці електродами Т15К6 товщина покриття збільшується на 48,6 %, при обробці електродами ІМХ2 – на 75 %, при обробці електродами Ш2 – на 83,3 %.

Аналіз експериментальних залежностей мікротвердості покриттів на зразках зі сталі 15ХГН2ТА, від анодно-катодної напруги та розрядної ємності конденсаторів, показав, що підвищення енергетичних режимів обробки по різному впливає на характер зміни мікротвердості покриттів при зміні матеріалу легуючого електрода (рис. 4, 5).

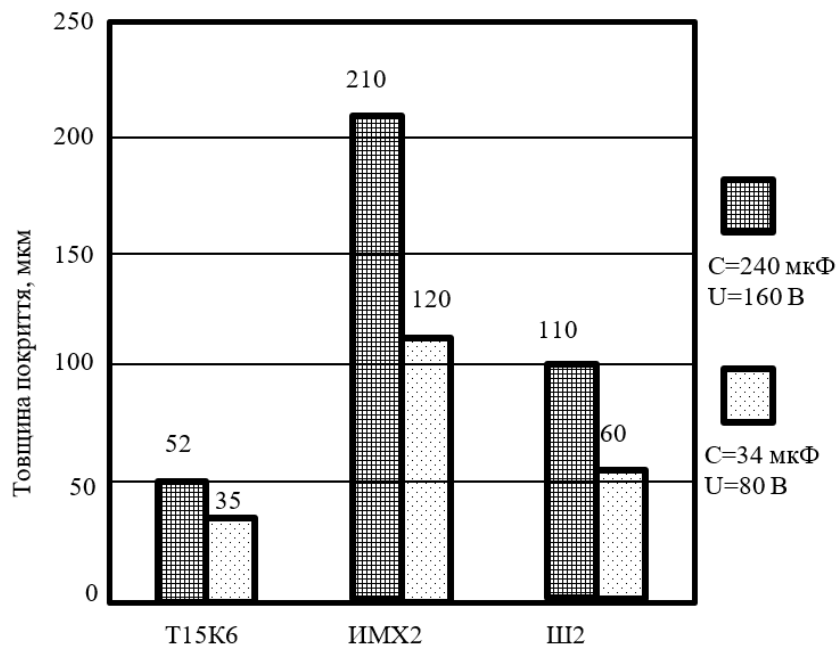
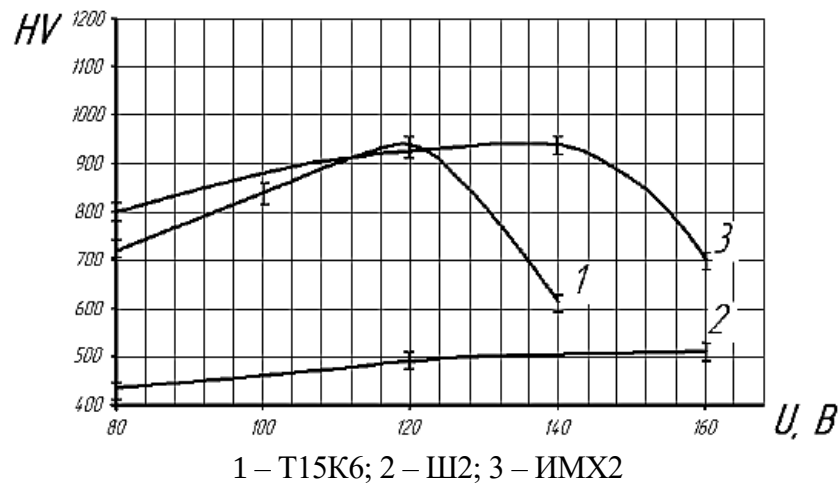
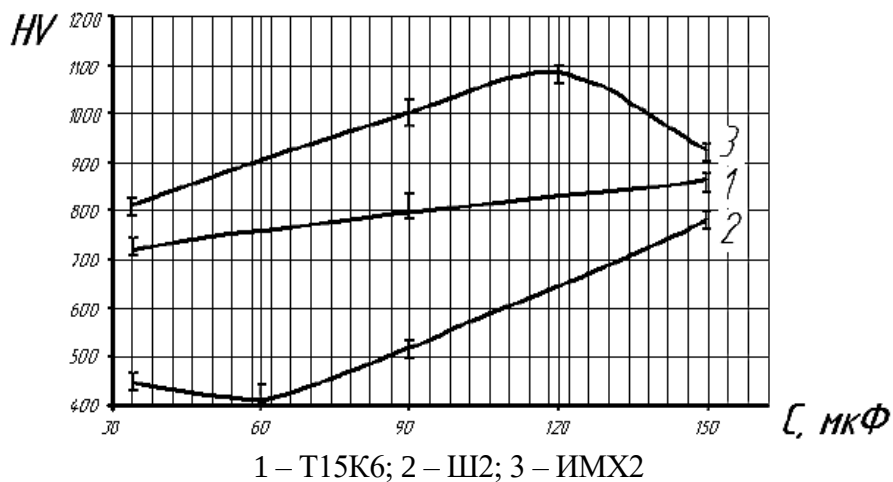


Рисунок 3 – Товщина покриттів зразків зі сталі 15ХГН2ТА при різних матеріалах електродів



1 – T15K6; 2 – Ш2; 3 – ИМХ2

Рисунок 4 – Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих ЕЛІ різними електродами, від анодно-катодної напруги при $C = 34$ мкФ



1 – T15K6; 2 – Ш2; 3 – ИМХ2

Рисунок 5 – Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих ЕЛІ різними електродами, від розрядної ємності при $U = 80$ В

Кількісний хімічний склад вихідного (не модифікованого) зразка та покриттів на сталевих зразках, оброблених електродами T15K6, Ш2 і ИМХ2, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Елементний склад покриттів на зразках зі сталі 15ХГН2ТА

Зразок	Хімічний елемент, %							
	Fe	Cr	Mn	Ni	Si	Ti	W	O
Сталь 15ХГН2ТА	95,3	1,09	1,95	1,66				
Покриття ЛЕ T15K6	54,87					12,34	32,8	
Покриття ЛЕ ИМХ2	23,73	14,39		58,02	3,86			
Покриття ЛЕ Ш2	47,05			7,32		29,56		16,07

Наведені результати показують, що елементний склад вихідної поверхні зразка зі сталі 15ХГН2ТА відрізняється від складу покриттів і поверхневих шарів зразків, модифікованих ЕЛІ різними електродами. У модифікованих зразках не встановлена наявність ряду елементів сталі 15ХГН2ТА: хрому, марганцю та нікелю при обробці електродом T15K6, хрому та марганцю при обробці електродом Ш2, марганцю та титану при обробці електродом ИМХ2.

Виконане дослідження дозволило також визначити характерний розмір структурних елементів (D), висотні параметри шорсткості поверхні: середнє арифметичне відхилення профілю (R_a), глибину найбільшої западини (R_v) і висоту найбільшого виступу (R_p) профілю поверхонь зразків (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри поверхні вихідного та модифікованих зразків

Зразок / Параметр	Характерний розмір структури D , нм	R_a , мкм	Висота найбільшого виступу профілю R_p , нм	Глибина найбільшої западини профілю R_v , нм
Сталь 15ХГН2ТА (вихідна)	2000-2500	-1,6	379,0	344,8
Покриття ЛЕ T15K6	200-250	-2,5	477,3	378,5
Покриття ЛЕ Ш2	150-200	-3,2	504,1	485,7
Покриття ЛЕ ИМХ2	250-300	-6,3	538,3	484,4

Аналіз отриманих значень параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь показує, що параметри: R_a , R_p і змінюються залежно від матеріалу електрода. Параметри збільшуються в наступному порядку: вихідний стан поверхні обробка електродом T15K6 обробка електродом Ш2 обробка електродом ИМХ2 (табл. 2). При цьому, параметр R_a збільшується в 1,5–3,9 рази. Найбільше збільшення параметра шорсткості R_a до 6,3 нм і параметра R_p до 538,3 нм спостерігається при обробці електродом ИМХ2. Це може бути пов'язане з більш високим рівнем енергетичного впливу при електроіскровій обробці даним електродом.

Отримані значення (табл. 2) характерних розмірів структурних елементів поверхні показують, що в модифікованих зразках у порівнянні з вихідним станом вони зменшуються в 8–13 разів. Мінімальні розміри параметра D отримані при обробці електродом Ш2.

Висновки

1. Встановлено, що товщина формованого покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електрода й енергетичних режимів ЕІЛ: найбільша товщина покриття утворюється при обробці електродом ИМХ2, що в 4 рази більше, чим при обробці серійним електродом Т15К6; підвищення енергетичних режимів ЕІЛ приводить до збільшення товщини покриття не залежно від матеріалу ЛЕ, що дозволяє рекомендувати ЕІЛ електродами Т15К6, ИМХ2, Ш2 для підвищення зносостійкості та відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин.

2. Встановлено, що мікротвердість покриттів залежить від режимів електроімпульсної обробки й матеріалу легуючого електрода. Експериментальні залежності мікротвердості покриттів в залежності від напруги й розрядної ємності конденсаторів мають екстремальний характер з максимумами при напрузі $U = 120-140$ В та розрядної ємності $C = 120$ мкФ.

Список використаної літератури

1. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст] : навч. посіб. для студ. спец. «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навч. / А. Г. Фесенко та ін. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. 104 с. URL: http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/a96c0b4097bdde8f1a71abeca0cae5deMetodi-poverxneвого-zmicnennya-u-procesi-vigotovlennya-detalej-mashin_Bechke.pdf.
2. Спеціальні покриття в машинобудуванні [Текст] : навч. посіб. / А. Г. Фесенко та ін. Д : РВВ ДНУ, 2009. 92 с.
3. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. 109 с. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2024/02/12_Pupan_Navch_posibnik_Lazerni-tehnologiyi-u-mashinobuduvanni.pdf.
4. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т. В. Способи зміцнення металів : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2021. 89 с. URL: https://nmetau.edu.ua/file/sposobi_zmitsnennya_metaliv.pdf.
5. Кіндрачук М. В. Трибологія : підручник. Київ : «НАУ – друк», 2009. 345 с.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИЛИВКІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ З ЧАВУНУ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ ¹⁷

Олександр ІВАХНЕНКО, здобувач вищої освіти групи МС-31-22
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ) має достатньо високий рівень механічних та ливарних властивостей. З нього виготовляють вироби транспортного призначення. Для покращення якості виливків розподільних валів з ЧВГ запропонована технологія модифікування.

Ключові слова: розподільний вал, чавун, модифікування, вермикулярний графіт, ферит, перліт.

IMPROVING THE QUALITY OF CAMSHAFT CASTINGS MADE OF CAST IRON WITH VERMICULAR GRAPHITE

Oleksandr IVAKHNENKO, student of group MC-31-21
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. Cast iron with vermicular graphite (CVG) has a sufficiently high level of mechanical and casting properties. It is used to manufacture products for transport purposes. To improve the quality of camshaft castings from CVG, a modification technology has been proposed.

Keywords: camshaft, cast iron, modification, vermicular graphite, ferrite, pearlite.

Вступ

У світлі зростаючих вимог до конкурентоспроможності вітчизняного машинобудування в інноваційній економіці, проблема підвищення технічних та експлуатаційних характеристик машин та обладнання, що випускається, є досить актуальною. Враховуючи, що майже половину деталей машин складають литі заготовки та близько 80 % з них припадає на частку чавунних виливків, стає очевидною актуальність і необхідність вирішення проблеми підвищення якості литих виробів за рахунок створення ефективних технологій виготовлення виливків із високими споживчими характеристиками. Це повною мірою можна віднести до чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ), які характеризуються високим рівнем механічних і ливарних властивостей, високою теплопровідністю [1]. Крім того, чутливість механічних властивостей до зміни швидкості охолодження у ЧВГ значно менше, ніж у сірого чавуну, що дозволяє забезпечувати високу якість різностінних виливків складної конфігурації незалежно від маси виливка. Крім того, у ЧВГ нижче

¹⁷ Робота виконана під керівництвом доцента Наталії ЛАЛАЗАРОВОЇ

схильність до відбілу, ніж у сірого та високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ), і менше, ніж у ВЧКГ лінійна усадка, що дозволяє виготовляти виливки без прибутків і не мати відбілу тонкостінних виливків. Таким чином, ЧВГ придатний для виготовлення широкої номенклатури деталей в машинобудуванні – розподільчих валів, картерів, гальмівних барабанів та ін.

Однак впровадження ЧВГ, що має, як показала практика, унікальне поєднання фізико-механічних і ливарних властивостей, у вітчизняне машинобудування відбувається досить повільно, що можна пояснити.

Пояснення цього явища криється у відносно високій собівартості виливків із ЧВГ через високу дефектність їх мікроструктури, пов'язану з недосконалістю технології модифікування на вермикулярний графіт [2]. Тому проблема отримання якісних виливків з ЧВГ із стабільною структурою за рахунок вдосконалення процесу модифікування, є актуальною.

Аналіз публікацій

Чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ) має унікальне поєднання характеристик – відносно високої міцності з високими теплопровідністю, границею текучості, демпфуючою здатністю та низьким коефіцієнтом теплового розширення, високим рівнем ливарних властивостей, що дозволяє його рекомендувати для виготовлення виливків транспортного призначення. Однак впровадження у виробництво ЧВГ стримується недосконалістю процесу модифікування, що не дозволяє отримувати якісні виливки [2].

Для забезпечення оптимальної комбінації ливарних властивостей, міцності, механічної оброблюваності та теплопровідності ЧВГ повинен містити вермикулярний графіт (ВГ) $\geq 80 \%$, при частці кулястого графіту (КГ) $\leq 20 \%$ та відсутності пластинчастого графіту (ПГ).

Висока частка КГ різко збільшує схильність складних виливків до утворення усадкових раковин і пористості, а також призводить до теплових відмов при експлуатації двигунів.

Технологічні процеси виготовлення виливків з ЧВГ включають, як правило, дві стадії позапічної обробки вихідного розплаву [3]:

- сфероїдизуючу (вермикуляризуючу) обробку (модифікування), що забезпечує формування графіту вермикулярної форми;
- графітизуюче модифікування (інокулювання), що сприяє найбільш повному виділенню графіту без структурно вільного цементиту (ледебуриту).

З метою більш ефективного впливу на розплав та отримання максимального результату рекомендовано зазначені стадії розділяти та проводити послідовно.

У всіх пропонованих технологіях виробництва чавуну з вермикулярним графітом використовують наступні основні чотири методи або варіанти обробки вихідного розплаву [3, 4]:

I – обробка магнієм, як основним широко поширеним і дешевим сфероїдизуючим графіт елементом, при введенні свідомо меншої його кількості, ніж необхідно для повної сфероїдизації графіту в чавуні;

II – обробка одночасно (або послідовно) магнієм і десфероїдизуючим графіт елементом (головним чином титаном);

III – сфероїдизуюча обробка магнієм і за її результатами в залежності від отриманої форми графіту в пробі здійснюється або добавка десфероїдизатора (при отриманні переважно

кулястого графіту), або додаткове введення сфероїдизатора (у разі отримання переважно пластинчастого графіту);

IV – обробка рідкоземельними металами (РЗМ).

З ряду відомих способів сфероїдизуючої обробки вихідного рідкого чавуну магнійвмісними присадками (модифікаторами) в даний час на переважній більшості підприємств для виготовлення ЧВГ використовують ті ж способи, що і при виготовленні виливків з чавуну з кулястим графітом. Для формування структури та властивостей ЧВГ використовують також технологію внутрішньоформного модифікування.

Найбільш широко в якості модифікаторів ЧВГ використовують модифікатори марок КМг1 – КМг9, ФС45, ФС75, КМг4, КМг3, КМг9, ФС30РЗМ30, ФС10РЗМ10 [5, 6].

На основі проведеного аналізу була запропонована мета роботи та завдання, які необхідно виконати, щоб її досягти.

Мета роботи і завдання

Метою роботи є отримання якісних виливків із стабільною структурою з ЧВГ за рахунок вдосконалення процесу модифікування.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- аналіз існуючих шляхів модифікування ЧВГ, вибір модифікатора та способу модифікування;
- дослідження впливу модифікування на структуру та властивості ЧВГ.

Матеріал і методи дослідження

Дослідження проводилися на чавуні хімічного складу: 4,03 % С; 0,012 % S; 1,9 % Si; 0,39 % Mn; 0,094 % Cr; 0,06 % Ni; 0,15 % Cu; 0,027 % Ti; 0,037 % P. Експериментальні плавки виконувались в індукційній тигельній печі LFD-20. Визначення показника міцності σ_b проводили на розривній машині моделі UIT STM 50, вимірювання твердості – на твердомірі моделі UIT HBW-1, що працює за методом Брінелля. Дослідження мікроструктури чавуну виконувались на оптичному мікроскопі.

Результати дослідження

Із аналізу зробленого вище, можна зробити висновки, що ЧВГ найбільш раціонально використовувати для виготовлення деталей транспортного призначення. У зв'язку з цим формування структури та властивостей ЧВГ розглядалося з використанням технології внутрішньоформного модифікування на прикладі формування виливка розподільного валу.

Встановлено, що при отриманні ЧВГ при внутрішньоформному модифікуванні, на відміну від ковшового, перемішування розплаву істотно гірше та в результаті повноцінного рівномірного перерозподілу компонентів чавуну не відбувається, розвивається розшарування кулястого та вермикулярного графіту.

Додатковим фактором, що погіршує структуроутворення, є використання як матеріалу для внутрішньоформної обробки ЧВГ модифікатора з відносно високим вмістом магнію (понад 6,5 %) і низьким вмістом РЗМ (менше 0,8...1,0 %) у кількості, недостатній для отримання необхідного ступеня сфероїдизації графіту (ССГ).

Всі вищезазначені недоліки найбільш яскраво виражені при отриманні довгомірних виливків (при співвідношенні середнього діаметра до довжини $> 1:15$), а саме вилівка розподільчого валу, що показали виробничі випробування. Структура, одержувана у виливку з ЧВГ при модифікуванні за технологією внутрішньоформного модифікування, відрізняється від регламентованої для ЧВГ не тільки кількістю кулястого графіту (в ЧВГ більше 40 %), але і його розподілом за перерізом і довжиною вилівка. При використанні феросілікомагнію (модифікатор ФСМг7, середній вміст магнію – 7 %, РЗМ – 0,5 %) для формування вермикулярної форми графіту за рахунок ефекту немодифікування в мікроструктурі вилівка спостерігаються такі відхилення:

По-перше, має місце морфологічне розшаровування графіту за висотою перерізу вилівка: у верхній половинці відзначається наявність переважно кулястого графіту, а в нижній – переважно вермикулярного. Розшаровування графіту за висотою перерізу пояснюється тим, що розплав при затіканні в порожнину форми в процесі реакції з модифікатором в реакційній камері погано перемішується, і магній, що має малу питому вагу ($1,7 \text{ г/см}^3$), спливає у верхню частину вилівка, викликаючи, тим самим, утворення в ній переважно кулястої форми графіту. При цьому розкид за твердістю між верхньою та нижньою половинками перерізу вилівка складає в середньому 20-25 НВ.

По-друге, має місце неоднорідність структури за довжиною вилівка, що викликає початковий розкид за твердістю (від 12 до 56 НВ) між 1-м кулачком розподільчого валу (структура з переважанням вермикулярного графіту ВГф2, ВГф3 над кулястим) та 8-м (структура з кулястим графітом – КГД25, КГД18) кулачком.

По-третє, через відносно високий вміст у модифікаторі шлакоутворюючого елементу – кальцію та кілька завищеного вмісту магнію – мікроструктура чавуну забруднюється шлаковими включеннями.

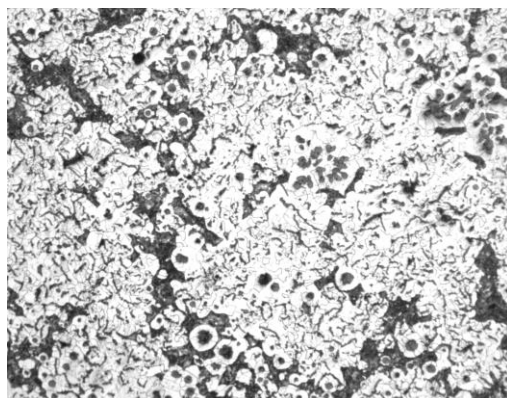
Відомо, що РЗМ є найкращими стабілізаторами вермикулярної (при підвищеному вмісті РЗМ та зниженому вмісті магнію) та кулястої (при зниженому вмісті РЗМ та підвищеному вмісті магнію) форм графіту в чавуні. При цьому слід враховувати, що вміст РЗМ у модифікаторі обмежується їх високою вартістю та антиграфітизуючими властивостями.

Порівнювали якість виливків, отриманих з вихідною лігатурою ФСМг7, з запропонованою технологією модифікування довгомірного вилівка.

Встановили, що одержання однорідної за графітом та з мінімальним перепадом механічних властивостей безцементитної структури ЧВГ у виливку за всією довжиною забезпечує розроблена технологія внутрішньоформного модифікування лігатурою ФС30РЗМ30 з перед модифікуванням лігатурою ФС75 масової фракції 150-200 г в чаші заливальної форми (рис. 1).

Після модифікування склад чавуну наведений в табл. 1.

Графіт у 1-му та 8-му кулачку вилівка розподільчого валу практично повністю представлений вермикулярною формою. Попереднє графітизуюче модифікування дозволило нівелювати в ЧВГ градієнт концентрації РЗМ за довжиною вилівка, в результаті чого отримано чавун з досить однорідною безцементитною структурою та невеликою кількістю перліту (П20) (табл. 2).



ВГф2, КГф1,4,5; ВГр2; КГр2; КГд25-180; Пт1; П10-П20
Рисунок 1 – Вихідна мікроструктура ЧВГ; збільшення $\times 50$

Таблиця 1 – Хімічний склад ЧВГ після модифікування

C, %	S, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	Ti, %	P, %	Mg, %	PЗМ, %
3,89	0,011	2,58	0,39	0,09	0,06	0,15	0,027	0,034	0,013	0,02

Таблиця 2 – Мікроструктура та властивості зразків ЧВГ після модифікування

σ_b , МПа	δ , %	HBW	Мікроструктура згідно стандарту		
			Перліт (ферит)	Цементит	Графіт, шкала №2-В
335,0	1,8	149	П20 (Ф80)	немає	ВГ70

Таким чином, запропонована технологія внутрішньоформного модифікування, яка дозволяє отримувати якісні виливки чавуну з вермикулярним графітом, що мають ферито-перлітну структуру.

Висновки

1. Чавун з вермикулярним графітом характеризується високим рівнем фізико-механічних і ливарних властивостей, що робить його незамінним матеріалом при виготовленні деталей транспортного призначення – блоків циліндрів, колінчастих і розподільчих валів та ін.

2. Однак не дивлячись на всі переваги ЧВГ спостерігається відставання в його застосуванні у вітчизняному машинобудуванні від високоміцного чавуну з кулястим графітом, що пов'язано з недосконалістю технології модифікування на вермикулярний графіт.

3. Одержання однорідної за графітом і з мінімальним перепадом механічних властивостей безцементитної структури ЧВГ за всією довжиною довгомірного виливку забезпечує технологія внутрішньоформного модифікування лігатурою ФС30РЗМ30 з перед модифікуванням лігатурою ФС75.

Список використаних джерел

1. Скобло Т. С., Сідашенко О. І., Сайчук О. В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники : монографія / ред. Т. С. Скобло. Харків : Діса плюс, 2019. 282 с.

URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8027/1/Skoblo_Body%20parts%20made%20of%20cast%20iron_monograph_2019.pdf.

2. Єременко А. П. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво виливків з чорних металів» розділ «Виробництво виливків з чавуну» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-професійною програмою «Металургія» очної та заочної форм навчання. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 74 с. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/23/5-23-kl17.pdf>.

3. Чавун з вермикулярним графітом. Виробництво. Властивості. Використання : навч. посіб. / В. М. Кропівний та ін. ; ред. В. М. Кропівний. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2019. 222 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/9026>.

4. Growth mechanisms of vermicular graphite in cast iron / X. Lin et al. *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 29. P. 102993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102993>.

5. Смірнов О. М., Зборщик О. М. Позапічне рафінування чавуну і сталі : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 179 с.

6. Preparation Vermicular Graphite in Thin and Thick Wall Iron Castings / D. Kopyciński et al. *Archives of Foundry Engineering*. 2012. Vol. 12, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10266-012-0033-x>.

ПРОЄКТ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДИНКУ ¹⁸

**Іван САВИЦЬКИЙ, здобувач вищої освіти групи 132-22-2,
Наталія РОТТ, доцент, Ірина МАЦІЮК, доцент
Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка»**

***Анотація.** У статті представлено концепцію екологічного будинку з автономними інженерними системами: теплообмінним водопостачанням, збором дощової води, біотуалетом із метановідведенням, вентиляцією з рекуперацією та сонячною енергетикою. Розробка базується на раціональному розміщенні комунікацій відповідно до плану приміщень та орієнтації будинку щодо сторін світу. Мета – зменшити споживання зовнішніх ресурсів і продемонструвати практичне застосування принципів сталого будівництва.*

***Ключові слова:** екобудинок, рекуперація, метан, дощова вода, енергоефективність, автономія, сонячна енергія.*

ECOHOUSE CONCEPT

**Ivan SAVYTSKYI, student of the group 132-22-2,
Nataliia ROTT, Associate Professor, Iryna MATSIUK, Associate Professor
Dnipro University of Technology**

***Abstract.** The article presents the concept of an eco-house with autonomous engineering systems: heat-recovery water supply, rainwater collection, biotoilet with methane extraction, ventilation with heat recovery, and solar energy integration. The design is based on efficient placement of systems according to room layout and building orientation. The goal is to reduce external resource consumption and demonstrate the practical implementation of sustainable construction principles.*

***Keywords:** eco-house, heat recovery, methane, rainwater, energy efficiency, autonomy, solar power.*

Вступ

Сучасне індивідуальне будівництво дедалі частіше орієнтується на екологічність, автономність та енергоефективність. Зростаюча вартість ресурсів, кліматичні зміни та екологічна свідомість змушують шукати нові підходи до проектування житла. Одним із рішень є екобудинки – будівлі, що мінімізують споживання енергії та води, забезпечують повторне використання ресурсів і не шкодять довкіллю.

У цій статті представлено авторський варіант екологічного житлового будинку, де інженерні системи працюють у взаємозв'язку, забезпечуючи автономність і зменшення

¹⁸ Робота виконана під керівництвом доцента Наталії РОТТ

енергоспоживання. Особлива увага приділяється інтеграції технологій у план будинку з урахуванням просторової логіки та орієнтації на сонце.

Аналіз публікацій

У відкритих джерелах представлено широкий спектр рішень для екологічного домобудівництва. У технічних і науково-популярних матеріалах [1–3] висвітлюються переваги сонячних панелей, рекуперації тепла з вентиляції та каналізації, систем збору дощової води, а також використання біотуалетів з бактеріями для переробки органічних відходів.

Більшість проєктів, що згадуються в публікаціях, зосереджені на окремих аспектах екобудівництва: або на збереженні енергії, або на водоощадних технологіях. Водночас цілісні рішення, які поєднують кілька автономних систем в одному житловому просторі, залишаються рідкісними. Це відкриває простір для розробки комплексних рішень, адаптованих до конкретного планування та локальних умов.

Запропонована у статті модель спрямована саме на поєднання вже відомих технологій у єдину дієву систему в межах індивідуального житла.

Мета та завдання роботи

Метою роботи є розробка концепції екологічного житлового будинку з інтегрованими інженерними системами, які дозволяють знизити залежність від зовнішніх джерел енергії та води. У проєкті передбачено раціональне розміщення комунікацій відповідно до плану приміщень, використання технологій повторного застосування ресурсів (тепла, води, органіки), а також урахування орієнтації будівлі відносно сторін світу з метою підвищення енергоефективності.

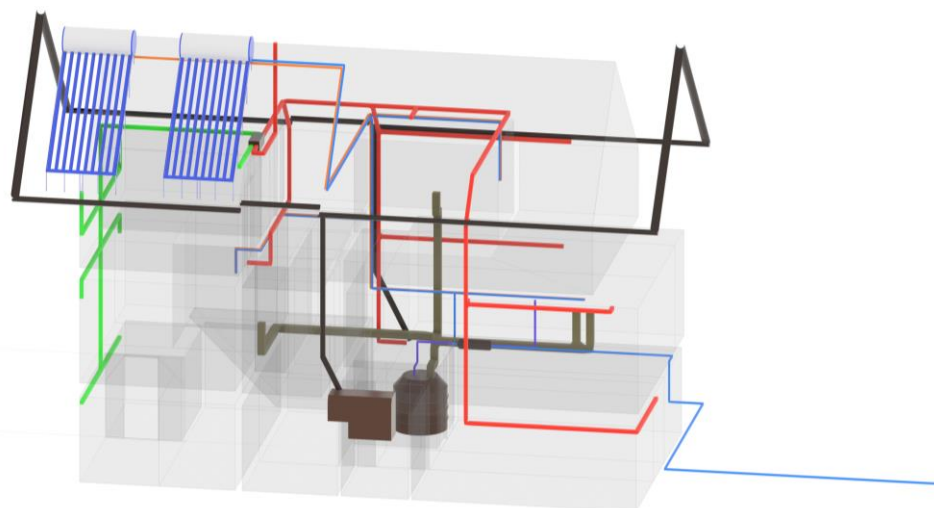
Матеріал і методи дослідження

При проєктуванні екобудинку було використано логіку потоків: холодна вода, гаряча вода, повітря, каналізація, електроенергія та метан – кожен елемент має своє обґрунтоване розміщення. Основний метод – це інженерне моделювання систем у межах конкретного архітектурного плану (рис. 1).

Стіни збудовані з пінобетону матеріалу, що поєднує легкість, вогнестійкість і високі теплоізоляційні властивості. Завдяки пористій структурі, пінобетон ефективно зберігає тепло та зменшує утворення термічних мостів – зон, через які можуть виникати теплові втрати.

Перекриття, будуть дерев'яними – через доступність, екологічність і здатність утримувати тепло. Дерево також забезпечує гарну акустику та естетичну привабливість внутрішніх приміщень.

Покрівля планується похилою, з металочерепицею або аналогічним матеріалом, придатним для встановлення сонячних батарей і трубопроводів для підігріву води сонячною енергією.



синій – холодна вода; помаранчевий – гаряча вода; мутно-зелений – біовідходи; зелений – свіже повітря; червоний – використане повітря; коричневий – водостік

Рисунок 1 – Схема розташування інженерних систем екобудинку

Простір додатково ізолюється сучасними матеріалами на основі мінеральної вати або ековати, з герметизацією стиків для запобігання утворенню температурних містків.

Результати дослідження

На основі розташування кімнат та інженерного планування було реалізовано кілька екологічних і функціональних рішень, описані нижче.

Система водопостачання з рекуперацією. Холодна вода надходить у будинок і спершу проходить через теплообмінник, де нагрівається за рахунок каналізаційних стоків. Потім піднімається на дах, де в сонячних трубах додатково нагрівається. Гаряча вода розподіляється до кухні та обох санвузлів. Така система дозволяє повторно використовувати тепло з каналізації та мінімізувати витрати енергії.

Система збору дощової води. Дощова вода стікає з даху у резервуар, де накопичується для подальшого використання, зокрема поливу рослин. Водостоки інтегровані у фасад і підключені до фільтраційної системи.

Біотуалет і повторна переробка. Стічні води з кухні та туалетів направляються у підвальну ємність, де містяться бактерії для переробки органіки. Як побічний продукт утворюється метан, який відводиться трубою до кухні для використання як паливо. Це рішення не тільки зменшує навантаження на навколишнє середовище, а й забезпечує часткову енергонезалежність.

Вентиляційна система з рекуператором. Будинок обладнаний вентиляцією з рекуперацією тепла, що дозволяє зберігати температуру всередині приміщень без значних втрат енергії. Система працює постійно, забезпечуючи приплив свіжого повітря.

Сонячні батареї. На даху розміщено фотоелектричні панелі, які забезпечують електроенергією освітлення, прилади та частково – опалення. Розташування панелей враховує кут нахилу даху та сонячну траєкторію для максимальної ефективності.

Орієнтація будинку. Будинок орієнтований так, що основні вікна виходять на південь. Це забезпечує максимальне сонячне освітлення взимку. Північна сторона має мінімум вікон і служить для технічних зон, що знижує теплові втрати.

Висновки

Запропонована концепція екобудинку поєднує сучасні технології збору, переробки та повторного використання ресурсів. Усі системи – водопостачання, каналізація, вентиляція, енергозабезпечення – працюють автономно та екологічно безпечно. Дотримання орієнтації будинку щодо сонячної траєкторії дозволяє додатково зменшити енерговитрати. Цей проєкт демонструє практичну реалізацію принципів сталого будівництва в межах індивідуального житла.

Список використаних джерел

1. Sustainable architecture and ecological design. *ArchDaily*.
URL: <https://www.archdaily.com/>.
2. Водопостачання й енергоефективність в приватному будівництві. *Build Portal*.
URL: <https://budport.com.ua/>.
3. Біотуалети в сучасному домобудівництві. *Ecotechnica*.
URL: <https://ecotechnica.com.ua/>.

СТАН ПОВЕРХНІ ПІСЛЯ ІОННОГО БОМБАРДУВАННЯ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ВИРОБУ ¹⁹

Сергій СЕЛЕЗНЬОВ, здобувач вищої освіти групи МС-21-23
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Досліджено вплив іонного бомбардування низькоенергетичними іонами титану на зміни стану поверхні та циклічну довговічність виробів зі сталей 40Х та 65Г.*

***Ключові слова:** сталь, поверхня, іонне бомбардування, субмікроструктурування, поверхнева шорсткість, циклічна довговічність.*

SURFACE STAND OF ION BOMBARDING AND INFLUTION ON THE CYCLIC DURABILITY OF THE VIROBE

Serhii SELEZNIOV, student of the group MC-21-23
Kharkiv National Automobile and Highway University

***Abstract.** The infusion of ion bombardment of low-energy ions to titanium on the surface change and the cyclic durability of viruses in steels 40X and 65G were observed.*

***Keywords:** steel, surface, ion bombardment, submicrostructure, surface hardness, cyclic durability.*

Вступ

Сьогодні одним з найбільш пріоритетних напрямів наукових досліджень є ультрадрібнозернисті та наноматеріали. Такий підвищений інтерес обумовлений можливістю отримання більш високого рівня технологічних та експлуатаційних характеристик традиційних конструкційних сталей і розширенням галузей їх застосування. Крім того це забезпечує економію дорогих високолегованих сталей і тим самим здешевлює сам виріб.

Як відомо, отримати ультрадрібне нанорозмірне зерно у значному об'ємі металу можна або методами інтенсивної пластичної деформації (рівноканальне кутове пресування, кручення під високим тиском та ін.), або способом порошкової металургії – ПМ. Однак ці методи технологічно складні, вимагають спеціального обладнання та мають певні недоліки. Інтенсивним пластичним деформуванням можна отримати лише малі за розмірами заготовки. Крім того, вироби із заготовок, як правило, потребують термічної обробки й тоді ефект здобутого високого рівня властивостей не зберігається. При використанні ПМ суттєвою проблемою є ще і залишкова пористість.

Значно простіше отримати ультрадрібнозернистої структури не у всьому об'ємі виробу, а тільки на його поверхні. В сучасній промисловості широко використовується нанесення на

¹⁹ Робота виконана під керівництвом професора Ірини ДОЩЕЧКІНОЇ

поверхню виробів різного складу іонно-плазмових покриттів (з метою зміни спеціальних властивостей саме поверхневих шарів (опору втомі, зносостійкості, коефіцієнту тертя, корозійної стійкості тощо). Особливістю таких покриттів є нанокристалічна структура та саме з нею пов'язують високі спеціальні експлуатаційні характеристики поверхневого шару після іонно-плазмової обробки (ІПО).

Технологія іонно-плазмової обробки ІПО (метод КІБ) складається з двох стадій: іонне бомбардування (ІБ) та нанесення покриття. При цьому ІБ є обов'язковою попередньою операцією, призначеною для якісного очищення поверхні та поліпшення адгезії покриття з основним металом [1]. Однак існують наукові роботи, які надають підставу розглядати поверхневі шари навантаженого твердого тіла як відкриту підсистему, поведінка якої в змінюється в процесі деформації та впливає на механічні характеристики виробу загалом. Таким чином зміни стану поверхні під дією ІБ повинні вплинути на деформаційну поведінку виробів під різними видами навантажень і зміни їх механічних властивостей. Це положення лягло в основу нашого дослідження.

Аналіз публікацій

В роботі [2] показано, що ІБ поверхні впливає на поведінку зразків і формування їхніх властивостей у процесі розтягання, а саме підвищуються показники міцності та водночас зберігаються високими дійсний опір руйнуванню Sk та характеристики пластичності виробу. При цьому механічні характеристики самого матеріалу не змінюються. Автори пояснюють це утворенням тонкого субструктурного поверхневого шару. На показники властивостей суттєво впливає відношення площі модифікованого шару до площі всього перерізу, а саме коли цей показник > 1 (тонкі плоскі зразки), то відбувається значна пластифікація при підвищенні міцності. В дослідженні [3] причина пластифікації зразків при розтяганні пояснюється заліковування поверхневих дефектів при ІБ формуванням в поверхневому шарі комбінованої субмікро-нанозеренної структури з широкими границями зерен, яка за сучасними уявленнями дозволяє істотно зменшити окрихчення матеріалу. Підвищення конструкційної міцності при ІБ найшло впровадження в промисловості при обробці шатунних болтів [4]

Мета і постановка завдання

Метою даної роботи є підвищення опору втомі та довговічності виробів.

Вирішувалися наступні завдання: дослідити структурні зміни, шорсткості поверхні під дією ІБ та їх вплив на циклічну довговічність.

Матеріал і методики дослідження

Сталі для дослідження були обрані з практичних міркувань. Зі сталі 40Х виготовляють деталі (осі, шатуни, шестерні, вали), які експлуатуються при багатозмінних циклічних навантаженнях, Сталь 60Г є ресорно-пружинною, та одна з основних вимог до виробів із таких сталей – висока втомна міцність. Вихідний стан зразків зі сталі 40Х – покращення (гартування з високим відпуском), а сталі 65Г – гартування із середнім відпуском.

Зразки у вихідному стані піддавали іонному бомбардуванню низько енергетичними ($\sim 1,5$ кеВ) іонами титану у середовищі аргону на установці «Булат-3т». Параметри процесу

(тиск газу, сила струму, напруження) вибирали з урахуванням запобігання розігріву зразка. Час обробки складав 30 та 90 сек. Для забезпечення рівномірної обробки поверхні зразки оберталися за допомогою планетарного механізму.

Для випробувань на втому виготовлялись спеціальні нестандартні зразки з укороченою робочою частиною за рахунок перехідних перетинів, що дозволило зменшити викривлення (не більше 0,05 мм) і збільшити жорсткість (рис. 1).

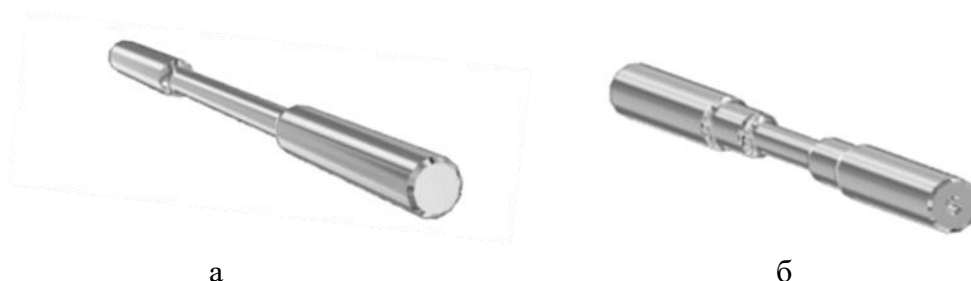


Рисунок 1 – Стандартний зразок (а) та з укороченою робочою частиною (б)

Як відомо, стан робочої поверхні зразка, а саме шорсткість поверхні, значно впливає на показник границі витривалості й тому вона була ретельно полірована.

Випробування на втому виконували на машині МУІ-6000 за стандартною схемою чистого повторно-змінного вигину за симетричним циклом. База випробувань складала 10^7 циклів навантаження. З метою отримання достовірних результатів для кожного стану матеріалу випробуванням підлягали не менш 5 зразків.

Мікроструктуру вивчали на оптичному мікроскопі UIT MicroMet-I-102BD та при великих збільшеннях на електронному мікроскопі REM-106.

Шорсткість та профіль поверхні оцінювали за допомогою профілометра-профілографа NR200.

Результати дослідження

У результаті іонного бомбардування протягом 30 с видимих змін мікроструктури зразків не відбувалося. Відмінність була лише в присутності на поверхні після ІБ невеликої кількості крапель титану (рис. 2)

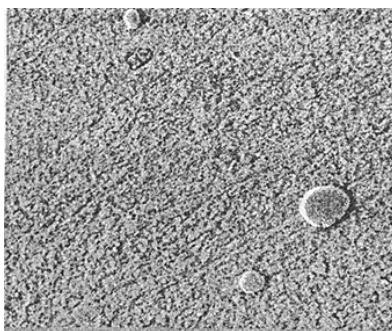


Рисунок 2 – Поверхня зразка сталі 40Х після ІБ протягом 30 с; $\times 600$

Після ІБ протягом 90 с мікроструктура поверхневого шару суттєво змінилася: відбулося різке подрібнення зерна за рахунок кінетичної енергії іонів титану. До ІБ середній

розмір зерна був 40 мкм, а після поверхневої обробки в тонкому поверхневому зменшився до 650 нм (рис. 3).

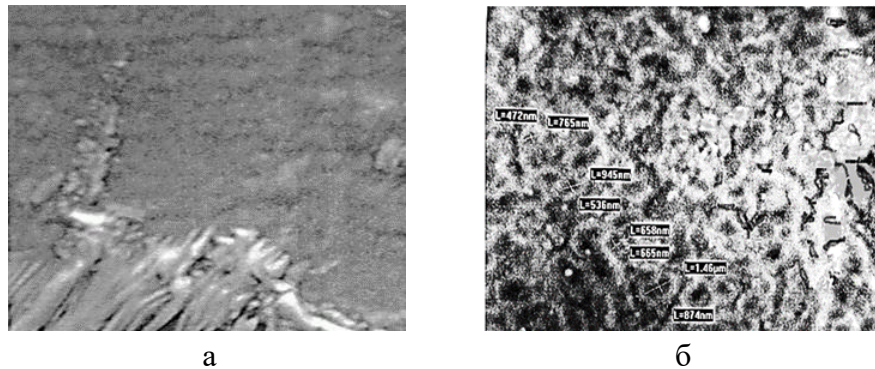


Рисунок 3 – Мікроструктура зразка сталі 40Х до (а) та після (б) ІБ протягом 90 с; $\times 8000$

Аналогічні структурні зміни після ІБ були виявлені й у зразка зі сталі 65Г (рис. 4). Зафіксована розвинена субструктура з широкими межами зерен, розмір яких в межах 600-800 нм.

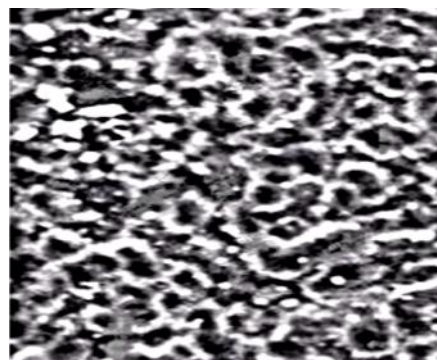


Рисунок 4 – Мікроструктура зразка сталі 65Г до (а) та після (б) ІБ протягом 90 с; $\times 12000$

Окремі краплі титану, що осідають на поверхні під час ІБ, потрапляють в місця поверхневих дефектів (пори, западини, мікротріщини), «заліковуюють» їх і зменшують кількість концентраторів напруження (рис. 5).

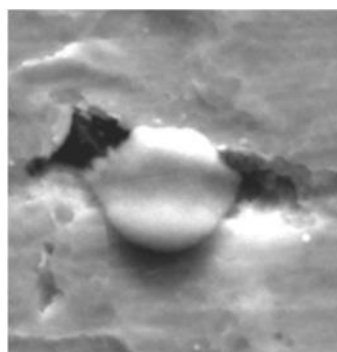
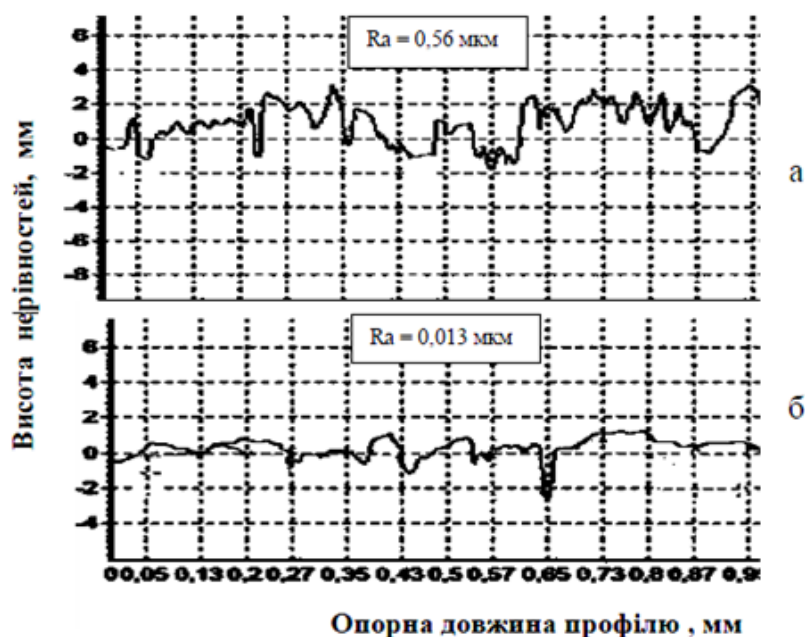


Рисунок 5 – Крапля титану у западині на поверхні зразка під час ІБ; $\times 8000$

Показники шорсткості поверхневого шару свідчать, що незважаючи на наявність краплинного титану та розвинену субструктуру, глибина рельєфу поверхні після ІБ значно зменшується, що показують профілограми на рис. 6.



а – до ІБ, б – після ІБ

Рисунок 6 – Шорсткість поверхні зразка зі сталі 40Х

Такі зміни стану поверхневого шару, як зменшення шорсткості, «заліковування» поверхневих дефектів, дуже суттєве подрібнення зерна повинні позначитися на довговічності виробів. Результати випробувань на циклічну довговічність зразків із досліджених сталей наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив ІБ на циклічну довговічність зразків зі сталей 40Х та 65Г

Матеріал та обробка	Напруження, МПа	Кількість циклів до руйнування	Результат випробувань
Сталь 40Х, вихідний	380	297600	зруйнувався
Сталь 40Х, вихід. + ІБ	380	1000000	не зруйнувався
Сталь 65Г, вихідний	380	937440	зруйнувався
Сталь 65Г, вихід. + ІБ	550	1116000	не зруйнувався

Виходячи з заводського досвіду, для визначення кількості циклів до руйнування зразків діаметром 7,5 мм напруження дорівнювало 380 МПа. Як видно з табл. 1, при такому напруженні зразок зі сталі 40Х без ІБ зруйнувався після 297600 циклів, а після ІБ він витримав 1000000 циклів без руйнування. Ще значне збільшення циклічної довговічності фіксується у зразків зі сталі 65Г. Без ІБ при напруженні 380 МПа руйнування відбулося через 937440 циклів, а після ІБ навіть при підвищенні напруження на 44 % (до 550 МПа – максимального для діаметра випробовуваних зразків) зразки витримали більше 11160000 циклів навантаження та не зруйнувалися.

Таким чином, переконливо показано, що модифікування поверхні одним із сучасних методів – бомбардуванням низькоенергетичними іонами, істотно підвищує опір втомі виробів при циклічних навантаженнях.

Висновки

1. Поверхнєве іонне бомбардування (ІБ) низькоенергетичними іонами титану на глибину менше 1 мкм приводить до суттєвих змін мікроструктурного стану.
2. Після ІБ значно подрібнюється зерно – з 40-50 мкм до 500-700 нм, формується розвинена субструктура, заліковуються поверхнєві дефекти, які є локальними концентраторами напружень і потенційними осередками формування мікротріщин.
3. Суттєво згладжується рельєф поверхні – шорсткість поверхнєвого шару зменшується з 0,56 до 0,015 мкм.
4. ІБ слід розглядати як самостійну обробку для суттєвого підвищення опору виробів втомі при циклічних навантаженнях, отже як спосіб підвищення довговічності виробів в експлуатації.

Список використаних джерел

1. Болотов Г. П., Болотов М. Г. Плазмові та променеві методи обробки матеріалів : метод. вказівки. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. 22 с. URL: <https://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/24879/Плазмові%20та%20променеві%20методи%20обробки%20матеріалів.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
2. Doschechkina I. The role of scale factor in the formation of prod-uct properties under the action of surface modifi-cation. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2021. No. 94. P. 97. DOI: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2021.94.0.97>.
3. Doshchechkina I., Lalazarova N., Tatarkina I. The effect of substructured surface layer on deformation behavior of products and change of their on-load properties. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід* : Матеріали III Міжнародної конференції, Дніпро-Амстердам, 12-14 November 2019. P. 211–215. URL: <https://nmetau.edu.ua/file/---sbornik-amsterdam-2019.pdf>.
4. Пономаренко І. В. Підвищення конструктивної міцності шатунних болтів іонним бомбардування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 146. С. 251–254.

ФОРМУВАННЯ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ ПІСЛЯ FDM-ДРУКУ ²⁰

Денис ЛИТОВКА, здобувач вищої освіти групи МС-41-21,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Показано, що застосування термічної обробки після FDM-друку забезпечує поліпшення пружно-пластичних властивостей полімерних матеріалів і розширює можливості застосування адитивних технологій для виготовлення і ремонту деталей машин.
Ключові слова: термічна обробка, полімерні матеріали, FDM-друк, пружно-пластичні властивості, міцність, пластичність.

FORMATION OF ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS BY THERMAL TREATMENT AFTER FDM PRINTING

Denys LITOVKA, student of group MS-41-21,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. It has been shown that the use of heat treatment after FDM printing improves the elastic-plastic properties of polymer materials and expands the possibilities of using additive technologies for the manufacture and repair of machine parts.
Keywords: heat treatment, polymeric materials, FDM-printing, elastic-plastic properties, strength, plasticity.

Вступ

Для широкого застосування полімерних матеріалів в адитивних технологіях виробництва та ремонту деталей машин потрібно підвищити їх пружно-пластичні властивості, в тому числі завдяки термічній обробці після FDM-друку. Поки що ці перспективні матеріали, які часто мають безперечні переваги по технологічним і експлуатаційним характеристикам, ще не реалізували свої потенційні можливості.

Результати досліджень [1, 2] дозволили сформулювати основні технічні вимоги до матеріалів, що використовуються для 3D-друку. Так матеріали, призначені для використання в FDM адитивних технологіях, повинні мати такі властивості: достатню міцність, що обумовлюється їх пружно-пластичними властивостями; термостабільність, тобто, мати мінімальну усадку; температура переробки повинна бути нижче за температуру початку деструкції; здатність утворювати при екструзії полімеру нитку заданого діаметру; містити мінімальну кількість вологи, перед переробкою матеріалу необхідне його сушіння.

²⁰ Робота виконана під керівництвом професора Юрія ДУДУКАЛОВА

Таким чином, для застосування у FDM адитивній технології 3D-друку можуть бути використані термопластичні матеріали різного призначення, але більшість з них потребує подальшого підвищення параметрів пружно-пластичних властивостей.

Актуальному питанню впливу термічної обробки після FDM-друку на пружні властивості полімерних матеріалів присвячене дане дослідження.

Аналіз публікацій

Адитивні технології на сьогоднішній день є глобальним трендом розвитку сучасного машинобудування, а їх використання демонструє те, як новітні розробки та передове устаткування можуть поліпшити традиційне виробництво [3].

Особливо слід відзначити технологічність полімерних матеріалів. Низька температура плавлення, високий рівень пластичності, добра оброблюваність цих матеріалів забезпечують значні переваги в технологічності виробництва з них виробів машинобудування. Крім того, зниження шуму, вібрації, динамічних навантажень, робочої температури в поєднанні з підвищенням корозійної стійкості та надійності виробів дозволяє відмовитися від ряду спеціальних проектно-конструкторських і технологічних заходів, спрямованих на забезпечення комфорту та безпеки машин. Застосування полімерних матеріалів забезпечує значну економічну ефективність [1, 4].

Властивості виробів з полімерних матеріалів значною мірою залежать від технології їх виготовлення та переробки матеріалу. Аналогічна залежність спостерігається і при виготовленні металевих виробів, проте вплив режимів переробки на властивості полімерних матеріалів має свої особливості, що пов'язані з будовою та перетвореннями надмолекулярної структури [4].

Одним з ефективних шляхів підвищення експлуатаційних характеристик композитів є застосування термічної обробки. Термічна обробка полімерних матеріалів є важливим технологічним процесом всього комплексу переробки полімерів [5, 6]. Навіть у тому випадку, коли до виробу з пластмас не пред'являються вимоги високої міцності або зносостійкості, для зняття внутрішньої напруги, що утворюється при виготовленні будь-якої деталі, необхідно проводити термічну обробку. Рациональною термообработкою термопластичних полімерних матеріалів, що кристалізуються, можна підвищити щільність, твердість, молекулярну масу, межу міцності при розтягуванні та стиску, ударну в'язкість, зносостійкість і стабільність геометричних розмірів деталей у процесі їх експлуатації.

Режим термообробки (рис. 1) характеризується максимальною температурою нагрівання $T_{\text{макс}}$; часом витримки t_2 матеріалу за цієї температури; швидкістю нагрівання $V_{\text{наг}}$ і швидкістю охолодження $V_{\text{ох}}$ матеріалу.

Ефективність термообробки залежить від усього циклу температурних режимів у процесі виготовлення виробу з полімерів. Для полімерів так само, як і для металів застосовують чотири види термообробки: загартування, відпал, нормалізація та відпуск.

Режим термообробки може бути складним, що складається з двох або декількох нагрівань, переривчастого та ступінчастого нагріву (охолодження). Термообробка може бути комбінованою, коли деталь після витримки в маслі за певної температури дещо охолоджується, а потім занурюється у воду з температурою 98°C для насичення вологою.

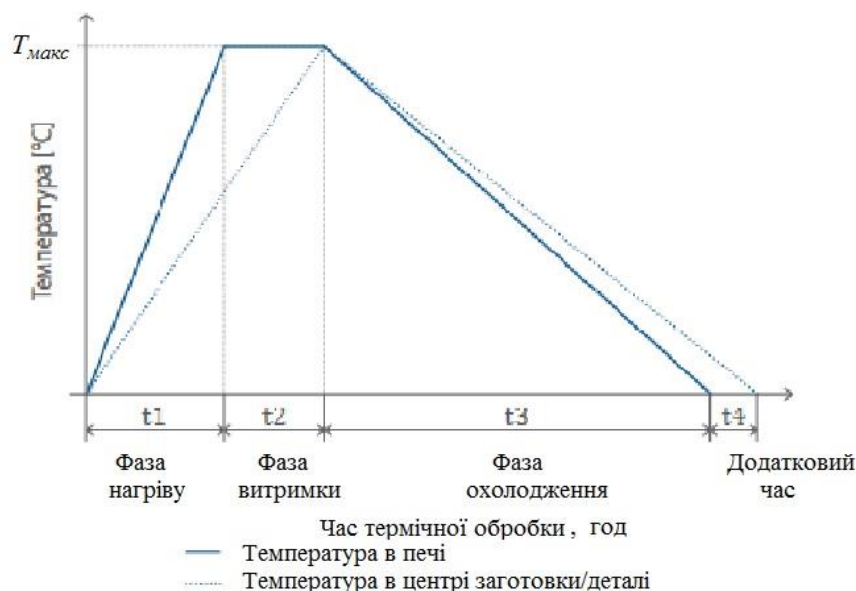


Рисунок 1 – Фази термічної обробки (відпалу)

Відпуск – це процес, що включає нагрівання полімерних деталей в інертному середовищі до температури нижче критичної точки даного полімеру з подальшим повільним охолодженням. Відпуск проводять для стабілізації та зниження внутрішньої напруги до величини, якої можна знехтувати. Відомі дані про успішне застосування відпустки сильфонів, виготовлених із поліпропілену. Таку термообробку проводили в мінеральній олії марки МС-20 при температурі 60–65°C з витримкою протягом 1 год і подальшим повільним охолодженням до 20°C. В результаті такої відпустки значно знизилася жорсткість сильфонів, і зусилля, необхідне їх стиснення, зменшилося майже вдвічі.

Вид режиму термообробки залежить від типу полімерного матеріалу, конструкції деталей та умов її експлуатації. На основі узагальнення вітчизняного та зарубіжного досвіду складено рекомендації щодо застосування термічної обробки деяких кристалічних термопластичних полімерних матеріалів [3]. Оптимальною температурою термообробки (загартування, відпалу) для кристалічних термопластів є температура максимальної швидкості кристалізації. Теоретичний інтервал кристалізації знаходиться між температурами плавлення та склування. Витримка деталей при вибраній температурі з метою прискорення процесу релаксації в готових виробах, що мають внутрішні напруження, залежить від молекулярної маси, надмолекулярної структури та температури термообробки.

Мета та завдання роботи

Мета роботи – встановлення умов підвищення пружно-пластичних властивостей полімерних матеріалів після FDM-друку для розширення можливостей застосування адитивних технологій при виготовленні та ремонті деталей машин.

Об’єкт дослідження – ресурсозберігаючі адитивні технології для виготовлення та ремонту деталей машин.

Завдання роботи – дослідження впливу термічної обробки після FDM-друку на пружно-пластичні властивості полімерних матеріалів.

Матеріали і методи дослідження

Для досліджень були виготовлені спеціальні зразки із полімерних матеріалів. Процес 3D-друку починається зі створення віртуальної 3D-моделі. Для створення таких моделей застосовувалась комп'ютерна програма Fusion 360 (рис. 2).

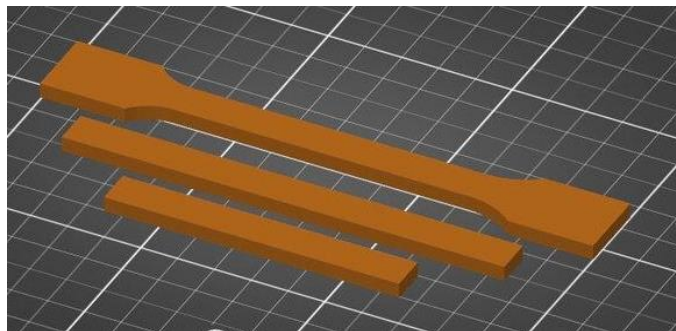


Рисунок 2 – 3D-моделі експериментальних зразків для досліджень

Зразки для випробувань були виконані на 3D-принтері моделі Ender 3Pro соплом 0,3 мм з одним периметром і 100 % заповненням.

Так, для експериментальних зразків з ABS пластику застосовувались наступні режими друку: температура екструдера – 250°C; швидкість друку – 80 мм/с; коефіцієнт подачі пластика – 0,97; діаметр сопла екструдера – 0,3 мм; ширина нитки – 0,45 мм; висота шарів – 0,25 мм; температура столу першого шару – 115°C; температура столу інших шарів – 105°C. Таким чином, в процесі друку полімерний матеріал має істотний термічний вплив, тому термічна обробка після генерації зразків може бути визначена як додаткова.

Для надійної фіксації пластику підвищують його адгезію до платформи. Роблять це нанесенням перфорованого покриття на стіл, лаком і підвищення його температури. На 3D-принтері моделі Ender 3Pro застосовується підігрів столу до 115°C, що допомагає зменшити ефект температурної усадки пластика та не дає моделі зігнутися, відірвавшись від столу.

Термічній обробці підлягали полімерні матеріали ABS, PLA, PETG і ASA при відпалі в 70°C, 90°C, 110°C, 130°C, 150°C і 170°C. Визначалась зміна розмірів і міцність на розрив у цих пластиків.

Були роздруковані 5 тестових зразків для досліджень. Результати експериментальних досліджень оброблялись методами математичної статистики.

Випробування зразків на розтягнення здійснювалося на випробувальній установці UTM STM 050/300. Визначалась межа міцності на розтяг. Метою експериментальних досліджень було отримання залежності межі міцності на розрив зразків з різних полімерних матеріалів від параметрів термічної обробки.

Межа міцності на розтягнення визначалась при швидкості випробувань на розрив 5 мм/хв.

Результати дослідження

Були роздруковані тестові зразки розміром 80×10×4 мм із PLA, PETG, ABS та ASA. Далі їх поділили на 7 груп. Першу групу не відпалювали, інші групи відпалювали за відповідними температурами.

До та після відпалу всі зразки були виміряні штангенциркулем по трьом осям. Розміри кожної групи зразків були усереднені. Виміри показали, що роздруківки зазнають найбільш сильне усадку по найдовшій стороні моделі – довжині (табл. 1). По ширині також спостерігалася усадка, але менша (табл. 2). А по товщині роздруківки майже не змінювалися в розмірі.

Таблиця 1 – Зміна відносних розмірів зразків по довжині, %

Марка полімеру	Температура відпалу, °C					
	20°C	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
PLA	100	98	96	94	92	90
PETG	100	99	98	96	94	92
ASA	100	98	92	89	–	–
ABS	100	97	92	88	–	–

Таблиця 2 – Зміна відносних розмірів зразків по ширині, %

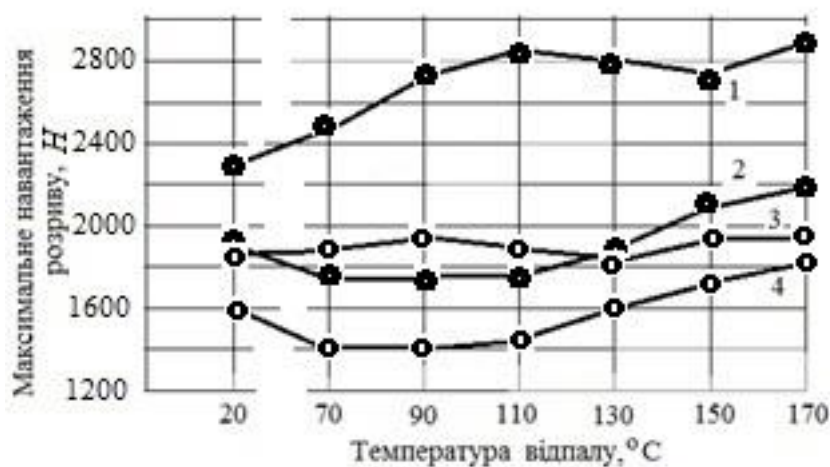
Марка полімеру	Температура відпалу, °C					
	20°C	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
PLA	100	98	96	95	94	92
PETG	100	99	98	97	96	95
ASA	100	98	94	90	–	–
ABS	100	97	94	89	–	–

Роздруківки з PLA виявилися найбільш схильними до зміни розмірів. Вже при 70°C вони починали деформуватися по всіх осях, а при подальшому підвищенні температури не просто деформувалися, а починали плавитися при 170°C.

PETG роздруківки витримували температуру до 90°C без значної деформації, а після підвищення температури до 110°C і вище починали перекинутися. При 170°C PETG починав плавитися.

ASA та ABS починали деформуватися при 110°C.

На розривній машині UIT STM 050/300 всі зразки розтягували у протилежні сторони, вимірюючи силу, необхідну для розриву виробів. Усереднені показники представлені на рис. 3.



1 – PLA; 2 – PETG; 3 – ASA; 4 – ABS

Рисунок 3 – Вимірювання міцності на розрив у відпалених роздруківках

Як показано на графіку, при відпалі 90°C і вище, міцність на розрив у PLA зросла більше, ніж у інших пластиків. Для PETG міцність на розрив зросла лише за температур вище 110°C, а от відпал при 70–90°C значно її знизив. Аналогічні результати спостерігаються у ABS а його межа міцності нижча, ніж у PETG. Міцність на розрив у ASA практично не змінювалася за будь-якої температури відпалу.

Для визначення впливу процесу відпалу на термостійкість виробів виміряли температуру теплової деформації у відпалених та невідпалених тестових зразків. Для визначення температури теплової деформації роздруківки повільно нагрівали з навантаженням 25 г, поки зразки не прогиналися на задану глибину 2 мм.

Для тесту зразки з матеріалів були розділені на 4 групи. Для кожного матеріалу 1 група залишалася невідпаленою, решта 3 відпалювалися при 70°C, 90°C, 110°C. Зразки, відпалені за вищих температур, тестувати сенсу не було, оскільки вони до тесту були занадто деформовані.

Результати вимірювань наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Максимальна температура теплової деформації

Марка	Температура відпалу, °C			
	20°C	70°C	90°C	110°C
PLA	58	58	105	128
PETG	75	75	78	85
ASA	105	110	110	105
ABS	105	115	110	110

Таким чином, термостійкість PLA зростає за температури відпалу в 90°C і 110°C. Але відпал при таких температурах сильно деформує PLA вироби та по суті може застосовуватися тільки до виробів з простою геометрією та відсутністю прецизійних деталей. Термостійкість PETG збільшилася лише при відпалі 110°C. Для ASA та ABS термостійкість практично не змінюється за будь-яких температур відпалу.

Висновки

Встановлено, що термостійкість PLA різко зростає за температури відпалу в 90°C і 110°C. Але відпал при таких температурах досить сильно деформує полімерний матеріал PLA і може застосовуватися тільки до виробів з простою геометрією та відсутністю прецизійних деталей. Для полімерного матеріалу PLA при відпалі 70°C міцність PLA роздруківки на розрив значно збільшується, а термостійкість при відпалі вище 90°C практично подвоюється. Але відпал PLA створює сильну деформацію навіть за 70°C. Тож можна рекомендувати відпал при 90°C.

Для ASA та ABS термостійкість практично не змінюється за будь-яких температур відпалу.

Для полімерів PETG показники термостійкості зростають при запіканні вище 110°C. Враховуючи, що з полімеру PETG роздруківки добре тримають форму до 110°C, можна відпалювати їх при цій температурі.

Таким чином, термічну обробку (відпал) доцільно застосовувати з досліджених полімерних матеріалів для PLA і PETG виробів простої геометрії без високоточних деталей.

Список використаних джерел

1. Формування способів підвищення ефективності застосування 3D-принтерів для комбінованого FDM-друку з модифікацією полімерних матеріалів / Ю. В. Дудукалов та ін. *Open Information and Computer Integrated Technologies*. 2024. № 98. С. 99–113. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.98.09>.
2. Поліщук О., Зозуля П., Поліщук А. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017 (255). № 6. С. 51–59. URL: <https://elar.khmnpu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c92b7e19-9b74-4ef2-9257-be72493f36de/content>.
3. Holmes L. R., Riddick J. C. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure *JOM*. 2014. Vol. 66, no. 2. P. 270–274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0828-4>.
4. Глушкова Д. Б., Тарабанова В. П., Нестеренко Е. А. Вплив різних видів поверхневої обробки на стан поверхні тертя. *Дні науки 2012* : Матеріали 8-ї Міжнар. науково-практ. конф. Прага, 2012. Т. 89. С. 53–58.
5. PLA. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/pla/pla-chernyj>.
6. ABS. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs/abs-chernyj>.

