

DOI: 10.31319/2519-8106.1(48)2023.280081

UDC 621.74

**Sereda Borys<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head Department of automobiles and automotive industry

**Серета Б.П.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів та автомобільне господарство

ORCID: 0000-0002-9518-381X

e-mail: seredabp@ukr.net

**Cherneta Oleg<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automobiles and automotive industry

**Чернета О.Г.**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та автомобільне господарство

ORCID: 0000-0002-3871-6923

e-mail: OCherneta@gmail.com

**Kubich Vadim<sup>2</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automobiles and automotive industry

**Кубіч В.І.**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та автомобільне господарство

ORCID: 0000-0002-0939-9092

e-mail: schmirung@gmail.com

**Ocheretyanuy Mykola<sup>1</sup>**, student master, Department of automobiles and automotive industry

**Очеретяний М.А.**, студент магістр, кафедра автомобілів та автомобільне господарство

e-mail: Kolo4eret@gmail.com

**Scorohod Maksim<sup>1</sup>** student master, Department of automobiles and automotive industry

**Скоруход М.В.**, студент магістр, кафедра автомобілів та автомобільне господарство

e-mail: mxmskorohod@gmail.com

<sup>1</sup>Dniprovsky State Technical University, Kamianske

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

<sup>2</sup>National University "Zaporizhzhya polytechnic", Zaporizhia

<sup>2</sup>Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя

## MATHEMATICAL MODELING OF CAR PARTS LOADING PROCESSES AND CHOICE OF OPTIMAL MATERIALS, COATINGS AND METHODS OF THEIR STRENGTHENING

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАВАНТАЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПОКРИТТІВ ТА СПОСОБІВ ЇХ ЗМІЦНЕННЯ

*Conducted in work research total loads on the camshaft of the internal combustion engine, the simulated distribution of torques and pressure on individual zones for the selection of the optimal material and methods of strengthening the surface layer of the cams of the camshaft of the internal combustion engine. Microstructures were studied and X-ray structural, phase composition and analysis of physical and mechanical characteristics of coatings after differentiated strengthening treatments were made, taking into account structural transformations in the surface layers. With the help of X-ray structural analysis, the structural and phase components of the surface layer of the camshaft cams made of steel 45 of the internal combustion engine were revealed.*

*The physico-mechanical characteristics of the coatings with the differentiated technology of strengthening due to boring and laser processing were studied.*

**Key words:** mathematical modeling, loading schemes, strengthening, boring, laser processing, microstructural analysis, combined method, technological processes of strengthening.

У роботі даний аналіз роботи газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання, розглянуті взаємодії контактуючих складових, особливості їх впливу, проведені дослідження сумарних навантажень на розподільний вал двигуна внутрішнього згорання, змодельований розподіл крутних моментів і тиск на окремі зони для підбору оптимального матеріалу і способів зміцнення поверхневого шару кулачків розподільного валу двигуна внутрішнього згорання. Для розподільного валу з маховиком на підшипникових опорах, момент інерції маси якого заданий, має місце обертання з кутовою швидкістю. Звичайно навантаження розраховують в поперечному перерізі вату при миттєвому заземленні його на правому торці.

Найбільш уражені і безпечні зони впливу елементів валу критичними навантаженнями, зміцнюються спеціальними обробками поверхневих шарів, що суттєво дозволяє підвищити сукупно абразивному зношенню контактуючих пар. Досліджено мікроструктури контактуючих поверхонь кулачків розподільного валу із сталі 45, зроблений рентгеноструктурний аналіз фазового складу робочої поверхні кулачка, проведені дослідження фізико-механічних характеристик покриттів після диференційованих зміцнюючих обробок з урахуванням структурних перетворень в поверхневих шарах. Комбінований спосіб модифікації здійснювали за допомогою бурювання і лазерної обробки, що включає попереднє бурювання в печі в середовищі борювальної речовини і з наступною обробкою імпульсним лазером при енергії накопичення  $E=28$  кДж,  $\Phi=8$  мм – з діаметром лазерного пучка і коефіцієнтом перекриття зон обробки 15%, з тривалістю імпульсу  $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$  с і з відстанню до мішені 70 мм, що дозволяє отримати на сталі 45 стабільний шар боридів і карборидів типу FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe(CB), Fe<sub>3</sub>(CB). За допомогою рентгеноструктурного аналізу виявлені відповідні структурні і фазові складові поверхневого шару кулачків розподільного валу із сталі 45 двигуна внутрішнього згорання. При модифікації поверхні деталі шляхом об'єднання двох послідовних операцій – насичення поверхневого шару бором в печі з утворенням надміцних фаз FeB, Fe<sub>2</sub>B з мікротвердістю  $H_{v,50}=16000$  МПа на сталі 45 на глибині 25 мкм. Недоліком надтвердих структур є її крихкість і схильність до тріщин утворення. Для усунення цих вад запропоновано лазерну обробку попередньо борюваних поверхней деталі. Голчаста мікроструктура поверхневого шару руйнується при бурюванні під дією лазерного опромінювання. Досліджені фізико-механічні характеристики покриттів при диференційованій технології зміцнення за рахунок бурювання і лазерної обробки.

**Ключові слова:** математичне моделювання, схеми навантаження, зміцнення, бурювання, лазерна обробка, мікроструктурний аналіз, комбінований спосіб, технологічні процеси зміцнення.

#### Problem's Formulation

With the increase in the reliability, durability and resource of the car in modern operating conditions with the simultaneous increase in loads, speed and temperature regimes of the main components, mechanisms and aggregates, they require a significant and careful selection of material and methods of processing the surface layer of the part. Up to 30 % of parts destruction is attributed to friction processes in contacting pairs of mechanisms. Therefore, special attention is paid to the state of the surface layer of the contacting pairs, namely strengthening technologies. The wear resistance of the surface layer, durability, reliability and service life of cars depends on the set of properties formed with different technological methods of strengthening.

#### Analysis of recent research and publications

In recent years, hundreds of technologies for strengthening the surface layer of parts have been applied in the world practice of machine-building production. The main criteria for choosing strengthening methods are high wear-resistant, physico-mechanical, operational properties of coatings and total costs for the technological process, equipment, consumables, environmental friendliness and safety. The mechanisms of formation of wear-resistant structures are highlighted in many scientific works of specialists [1, 2, 3]. In a significant number of scientific studies, processing regimes and the final result of the most common technological methods of processing are provided, where it is guaranteed that when certain operations are performed consistently, appropriate microstructures with specified indicators of microhardness and wear resistance are obtained on test steels. The use of high-energy energy sources became a significant direction in the field of strengthening treatments, which allowed to expand the spectrum of modification of surface layers, to significantly increase strong and wear-resistant characteristics.

### Formulation of the study purpose

On the basis of studies of the total loads on the camshaft of the internal combustion engine, the distribution of torques and pressure on individual zones was modeled to select the optimal material and methods of strengthening the surface layer of the cams of the camshaft of the internal combustion engine [4–5]. On the basis of the analysis of the use of the latest methods of strengthening, a methodology for choosing the optimal option for the use of wear-resistant technologies was developed, and a sequence of a combined method of modifying the surface layer by boring with subsequent laser treatment was developed.

### Presenting main material

The disadvantage of laser processing using different types of coatings is the impossibility of controlling the surface roughness of the part, the processes of structure formation, the concentration of alloying elements in the surface layers in the laser processing zone, the inhomogeneity of the processed surface, fluctuations in the microhardness of individual local processing zones, a significant violation of the microgeometry, and the need for additional finishing treatments.

Regarding the operation of the camshaft of the internal combustion engine, we must determine that the shaft is fixed on bearing supports and rotates, and due to the presence of cams, it performs the operation of the valve mechanism and controls the gas distribution processes. The condition of the surface layer of the cams of the camshaft directly depends on their wear resistance, which directly affects the durability, reliability and service life of the gas distribution mechanism as a whole.

The camshaft of an internal combustion engine has a complex shape, which is related to the specifics and algorithm of its operation, mode of operation and distribution of total loads. The presence of cams adds additional load to the crankshaft and depends on the number and size of the workpiece as a whole.

It is possible to mathematically describe the composition and influence of loads with the help of problems on the mechanics of elastic deformed systems, which is quite fully described in the works of F. L. Shevchenko [4]. If we use the standard scheme of shaft loads with the corresponding distribution of the influence of external forces and torques to the camshaft of the internal combustion engine, we will get the following load model of Fig. 1.

The camshaft with the flywheel on the bearing supports  $x$ ,  $J_\theta$  the moment of inertia of the mass  $\theta_\theta$  of which is given, rotates with the angular velocity of Fig. 1. Usually, the stress in the cross section of the shaft is calculated when it is momentarily pinched on the right end.

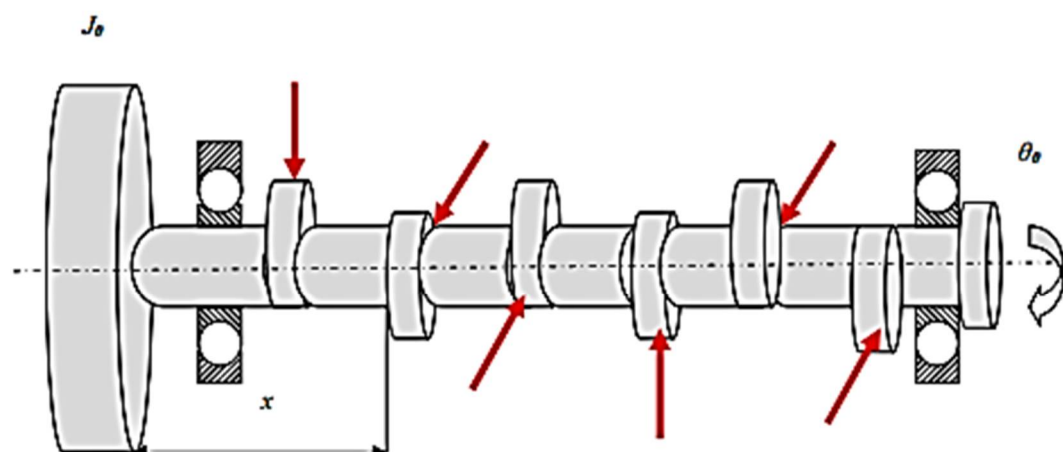


Fig. 1. Camshaft with a flywheel on bearing supports The equation of the angles of the torsion sections of the shaft has the form

$$\varphi(x, t) = \left( x_0 + \frac{M_0 x}{GI_p} \right) \sin(\omega t + \mu); \quad (1)$$

$$\dot{\varphi}(x, t) = \left( x_0 + \frac{M_0 x}{GI_p} \right) \omega \cos(\omega t + \mu). \quad (2)$$

The moment of inertia of the mass of the flywheel has the form

$$M_0 = I_0 \dot{\varphi}(0) = I_0 \omega^2 \varphi_0. \quad (3)$$

The equation of the angles of rotation takes the form

$$\varphi(x) = \varphi_0 \left( 1 - \frac{I_0 \omega^2 x}{GI_p} \right). \quad (4)$$

From the conditions  $\varphi(l) = 0$  we find the frequency of oscillations  $\omega = \sqrt{\frac{GI_0}{I_0 l}}$ .

From the initial conditions  $\varphi(x, 0) = 0$ ,  $\dot{\varphi}(x, 0) = Q_0$  we get a system of equations

$$\varphi_0 \omega \sin \mu = 0, \quad \varphi_0 \omega \cos \mu = Q_0. \quad (5)$$

We find the amplitude angle of rotation according to the expression

$$\varphi_0 = \frac{Q_0}{\omega} = Q_0 \sqrt{\frac{I_0 l}{GI_p}}. \quad (6)$$

Assuming that the torque has an expression  $M_x(x) = GI_p \dot{\varphi}(x)$ , then we have the equation

$$M_x(x) = -\varphi_0 I_0 \omega^2 = -Q_0 \sqrt{\frac{I_0}{l}} GI_p. \quad (7)$$

Taking into account the loads that occur in contacting pairs, in the bearing supports, it is possible to put forward requirements for the material, taking into account the working conditions, in relation to the camshafts. In conditions of mass production, strong, technological, economic aspects are added to the requirements of the material. The search for material is focused on available, widely used technological steels. The most affected and safe zones of influence of shaft elements by critical loads are strengthened with special surface layers, which significantly increases the resistance to abrasive wear of contacting pairs. The most common material for use in the production of camshafts of internal combustion engines of cars is steel 45.

With the modern mass production of cars, taking into account the cost of manufacturing their parts, the cost of materials while maintaining qualitative and physical and mechanical characteristics, indicators of reliability, durability and wear resistance, the future use of steel 45 is promising. At the same time, a significant increase in power is observed in the designs of modern cars, high-speed operation modes and, as a result, increased requirements for parts operating in severe operating conditions. The use of alloyed and highly alloyed steels significantly increases the cost of the material, its processing, complicates the technological processes of manufacturing parts. At the same time, the resource of using steel 45 is not fully exhausted, and the research of many scientists proves that with appropriate methods of processing the surface layer, it is possible to increase the wear resistance and corrosion resistance of parts by 3–4 times due to the modification of their surface layer and transformation of the microstructure.

#### Presenting main material

To evaluate the surface layer of parts made of steel 45, the following factors must be taken into account: geometric parameters of dimensions, surface roughness of the part, microstructure and hardness of worn surface layers. Steel 45 refers to medium-carbon high-quality structural steels of increased strength (C — 0,42–0,5; Mn — 0,5–0,8; Si — 0,17–0,37; P — 0,035; S — 0,04; Cr — 0,25; Ni — 0,3; Cu — 0,3. The strength and yield strength, respectively, after improvement is  $\sigma_s = 600 - 700 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{0,2} = 400 - 600 \text{ MPa}$ ; with reduced plasticity  $\delta = 23 - 14\%$ ;  $\psi = 50 - 40\%$ . Impact viscosity  $KCU_{-20} = 40 - 50 \text{ J/cm}^2$ ).

To study the microstructure of the restored cam of the distribution shaft made of steel 45 of a passenger car, fragments of the cam body were cut out (Fig. 2).

The fragments for the study were prepared according to a typical technology for the preparation of grindings: they were cut out in defined sectors from the body of the restored cam, which, after normalization, was previously processed in a reactor in a mixture of boron-containing substances at a temperature of 8500 C with subsequent cooling in air [6–7].

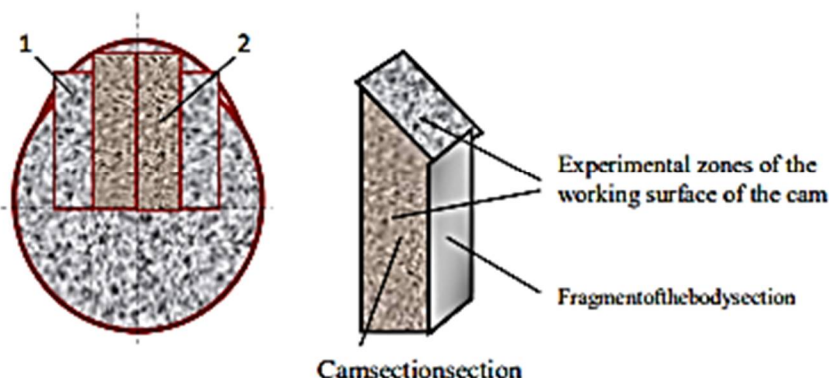


Fig. 2. Diagram of the cutting of fragments (1, 2) of the cross section of the cam

Fig. 3 (a, b) provides photographs of microstructures of selected fragments of cams for different zones of the surface layer. Thus, Fig. 3, a (802) shows a photograph of the microstructure of the zone located at a distance of 1.2 mm from the surface, Fig. 1, 2, b (804) shows the corresponding zone at a distance of 2 mm from the surface, and Fig. 3c (806) the corresponding zone is taken at a distance of 5 mm and the general view of the microstructure of the base metal is presented at a magnification of 500 times, which has a ferrite-pearlite structure. The basis of the structure consists of white pearlite grains of plate form and dark zones of ferrite, which is a typical manifestation of a normalized structure.

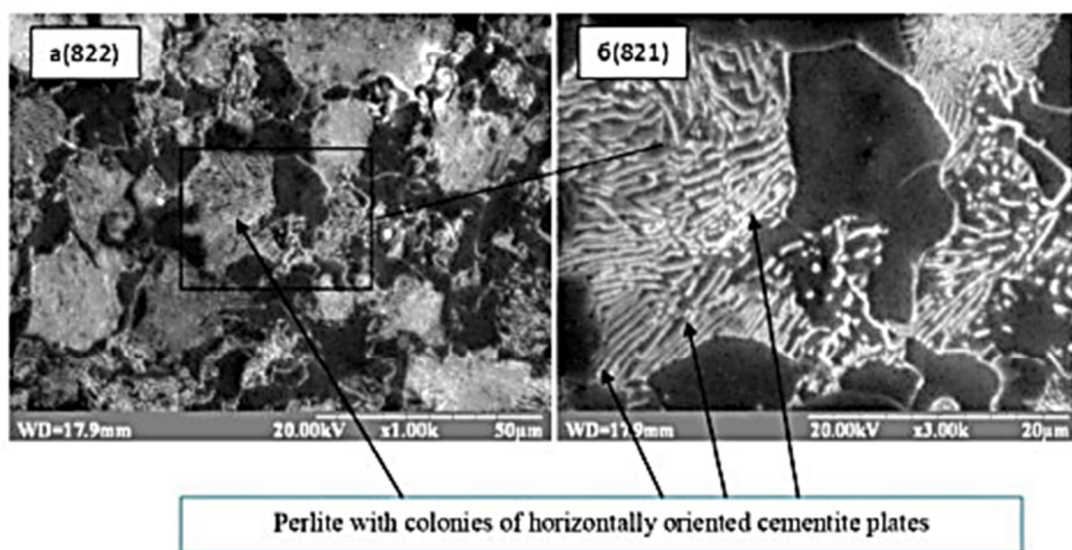


Fig. 3. Photographs of microstructures of the cam sector a.(822), b.(821) of the middle zone

Therefore, in the transition zone, residual austenite transforms into ferrite with the formation of two phases: ferrite particles (dark cascades) and the "boron + carbon" phase — boron carbide (white inclusions) Fig. 3, b.

A differentiated method of modification (boring and subsequent laser processing) includes preliminary boronizing in a furnace in an environment of boron-containing substances and subsequent processing with a pulsed laser at an accumulation energy of  $E = 28 \text{ kJ}$ ,  $\varnothing = 8 \text{ mm}$  — the diameter of the laser beam with a coefficient of overlap of the processing zones of 15 %, with with a pulse duration of  $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  and a distance to the target of 70 mm (Fig. 4) allows obtaining a stable layer of  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{CB})$ , borides and caboborides on steel 45.

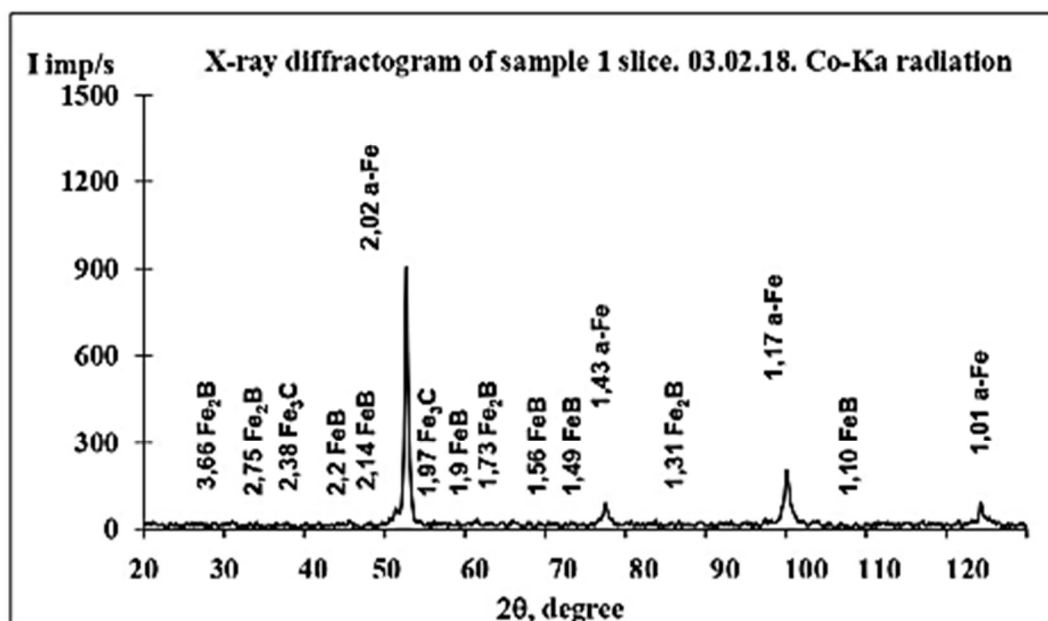


Fig. 4. X-ray diffractogram of sample 1 slice. 03.02.18. Co-Ka radiation

#### Conclusions

In the work, studies of the distribution of total loads on the camshaft of the internal combustion engine, the simulated influence of torques and pressure on individual zones were carried out. The optimal selection of material and methods of strengthening the surface layer of the camshaft cams of the internal combustion engine was made. The microstructures were studied and the X-ray structural, phase composition and analysis of the physical and mechanical characteristics of the coatings after the most common strengthening treatments, taking into account the structural transformations in the surface layers, was made.

#### References

- [1] Kindrachyk, M.F. & Labynets, V.F., & Pashechko, E.V. & Korbyt, M.I. (2009) TRIBOLOGIYA. [Pidrychnik]. KUYIV: "NAY-dryk".
- [2] Cherneta, O.G. & Babko, I.O. & Chaldushev, E.V. (2014). Doslidzhinnya tehnologichnuy sposobiv formuvannya znosostiykih pokrutiv na osnovi lazernoy obrobky [ Zbirnik naykovih prats.] "*Perspektivnye tehnologii ta prilady*" / Vup. 5(2) 171–176.
- [3] Cherneta, O.G. & Syhomlin, V.I. & Voloshyk, R.G. & Sereda B.P (2017) Doslidzhinnya mikrostrykty iznoshenih detaley avtomobiliv iz stali 45 pri vidnovleni i bagatokratniy termichniy obrobsi. "*Perspektivnye tehnologii ta prilady*" / Vup. 10(1) 212–217.
- [4] Cherneta, O.G. & Syhomlin, V.I. & Voloshyk, R.G. & Gybarev S.V. (2018) Osoblyvosti stryktyry vidnovlenogo poverhnevoogo shary stali 45 pislya zmitsnennya lazernym boruvanniam. [Zbirnyk naykovuh prats] "*Perspektivnye tehnologii ta prilady*" / Vup. 13(1) 170–175.
- [5] Shevshenko F. L. (1996). Zadachi po mehanitsi pryshnih deformovanyh sistem. [Navchalnuy posibnyk]. Kuyiv ICIO, 148–149.
- [6] Ivanov, S.G. & DonYadshy & Gyrev, A.M. (2016) Mikrostruktura dufysuonnoy zony staly 3 posle sovmestnogo nasusheniya borom i hromom [ Polzynovskuy almanah] №4, 5–11.

- [7] Cherneta, O.G. & Korobochka, O.M. & Syhomlin, V.I. (2021) Doslidshennya transformatsii mikrostruktury poverhneвого шару pislya boryvanya stali . *Results of modern scientific research and development* (pp.178–184).Madrid. Spain.

#### Список використаної літератури

1. Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут С.В. ТРИБОЛОГІЯ. Підручник., Київ, «НАУ-друк». 2009 р. 393 с.
2. Чернета О.Г., Бабко І.О., Чалдишев С.В. Дослідження технологічних способів формування зносостійких покриттів на основі лазерної обробки/ Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» Луцьк: ЛНТУ, Вип. 5(2). 2014. С. 171–176.
3. Чернета О.Г., Сухомлін В.І., Волощук Р.Г., Серета Б.П. Дослідження мікроструктури зношених деталей автомобілів із сталі 45 при відновленні і багатократній термічній обробці. Перспективні технології та прилади. м. Луцьк / червень 2017 р. ЛНТУ, Вип. 10(1). 2017. С. 212–217.
4. Чернета О.Г., Сухомлін В.І., Волощук Р.Г., Губарев С.В. Особливості структури відновленого поверхневого шару сталі 45 після зміцнення лазерним боруванням. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»//м. Луцьк, грудень 2018 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. Випуск 13. С. 170–175.
5. Шевченко Ф. Л. «Задачі по механіці пружних деформованих систем». Навчальний посібник. Київ ІСЮ, 1996 р. С. 148–149.
6. Иванов С.Г., Дон Яджи, Гурьев А.М.. Микроструктура диффузионной зоны стали ст3 после совместного насыщения бором и хромом. С.Г. Иванов, / Ползуновский альманах №4, 2016. С. 5–11.
7. Чернета О.Г., Коробочка О.М., Сухомлін В.І. Дослідження трансформації мікроструктури поверхневого шару після борування сталі 45., *Results of modern scientific research and development* (4-6 April 2021) Madrid. Spain. Pp. 178–184.

Надійшла до редколегії 16.02.2023