

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**



# **ВАЖКЕ МАШИНОБУДУВАННЯ. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

**МАТЕРІАЛИ**

**XXIV** **МІЖНАРОДНОЇ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**



**КРАМАТОРСЬК-СВАЛЯВА 2026**

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія  
Краматорський завод важкого верстатобудування  
Індустріальний парк «Френдлі Віндтехнолоджи»  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України  
Луцький національний технічний університет  
Національний університет «Одеська політехніка»  
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Чернігівська політехніка»  
Сумський державний університет

# **ВАЖКЕ МАШИНОБУДУВАННЯ. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

МАТЕРІАЛИ  
XXIV Міжнародної  
науково-технічної конференції

Краматорськ-Свялява 2026

**УДК 621.9**

Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 червня 2026 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ-Свалява: ДДМА, 2026. — 166 с.

**ISBN 978-617-7893-30-0**

В збірнику наведені матеріали до вирішення актуальних проблем важкого машинобудування, обороноздатності, конструювання, виготовлення та експлуатації машин, верстатів, інструментів, розробки та впровадження прогресивних енергозберігаючих технологій та ін.

### **ОСНОВНА ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ**

1. Сучасні проблеми машинобудування, металообробки, якості технологічних систем.
2. Нові напрямки розвитку процесів металообробки, металорізальних верстатів та інструментів.
3. Прогресивна техніка і технології для важкого машинобудування.
4. Нові інформаційні технології в управлінні виробництвом.
5. Проблеми інженерної освіти та підготовки кадрів вищої кваліфікації.
6. Автоматизація технологічних і виробничих процесів.
7. Обчислювальні мережі і системи, елементи і пристрої обчислювальної техніки та систем керування.
8. Застосування математичного моделювання в техніці та економіці.
9. Менеджмент та маркетинг.

Робочі мови конференції – українська, англійська.

## МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

### Голова

**Ковальов В.Д.,** д.т.н., проф. ДДМА

### Члени програмного комітету:

**Антонюк В.С.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Васильченко Я.В.,** д.т.н., проф. ДДМА  
**Воронцов Б.С.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Гасанов М.І.,** д.т.н., проф. НТУ "ХПІ"  
**Грицай І.Є.,** д.т.н., проф. НУ "Львівська політехніка"  
**Данильченко Ю.М.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Заковоротний О.Ю.,** д.т.н., проф. НТУ "ХПІ"  
**Залога В.О.,** д.т.н., проф. СумДУ  
**Калафатова Л.П.,** д.т.н., проф. ДонНТУ  
**Кассов В.Д.,** д.т.н., проф. ДДМА  
**Клименко Г.П.,** д.т.н., проф. ДДМА  
**Клименко С.А.,** д.т.н., проф., член-кор. НАНУ, ІНМ ім. В.Бакуля НАНУ  
**Клочко О.О.,** д.т.н., проф. НТУ "ХПІ"  
**Луців І.В.,** д.т.н., проф. ДУ "Житомирська політехніка"  
**Майборода В.С.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Марков О.Є.,** д.т.н., проф. ДДМА  
**Мельничук П.П.,** д.т.н., проф. ДУ "Житомирська політехніка"  
**Мироненко Є.В.,** д.т.н., проф. ДДМА  
**Митник М.М.,** к.т.н., доц. ТНТУ ім. І. Пулюя  
**Онисько О.Р.,** д.т.н., проф. ІФНТУНГ  
**Панчук В.Г.,** д.т.н., проф. ІФНТУНГ  
**Пасічник В.А.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Пермяков О.А.,** д.т.н., проф. НТУ "ХПІ"  
**Петраков Ю.В.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Повстяной О.Ю.,** д.т.н., проф. ЛНТУ  
**Равська Н.С.,** д.т.н., почесний проф. ДДМА  
**Родічев Ю.М.,** к.т.н., с.н.с. ІПМіц ім. Г.С.Писаренка НАН України  
**Сапон С.П.,** к.т.н., доц. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Сорока О.Б.,** д.т.н., ІПМіц ім. Г.С.Писаренка НАН України  
**Струтинський В.Б.,** д.т.н., проф. КПІ ім. Ігоря Сікорського  
**Ступницький В.В.,** д.т.н., проф. НУ "Львівська політехніка"  
**Тонконогий В.М.,** д.т.н., проф. НУ "Одеська політехніка"  
**Турчанін М.А.,** д.х.н., проф. ДДМА  
**Чухліб В.Л.,** д.т.н., проф. НТУ "ХПІ"  
**Cristian Barz,** Ph.D., Full Professor, North University Center of Baia Mare, Romania  
**Ehrentreich Torsten,** Dipl. Ingenieur, Berlin, Germany  
**Michał Bembenek,** Professor, AGH University of Science and Technology, Poland

**Iwona Przychocka,** Dr hab., professor, Helena Chodkowska University of Technology and Economics, Poland  
**Jarosław Ziółkowski,** PhD, DSc, Prof., Military University of Technology, Poland  
**Justyna Żylińska,** Dr, rector of Helena Chodkowska University of Technology and Economics, Poland  
**Predrag Dasic,** University Union "Nikola Tesla", Serbia  
**Volodymyr Hutsaylyuk,** Dr hab. Eng., Professor, MUT Institute of Robots and Machine Design, Poland

## **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ**

**Голова** **Васильченко Я.В.,** д.т.н., проф.,  
зав. каф. Машинобудування ДДМА

**Вчений секретар** **Шаповалов М.В.,** к.т.н.

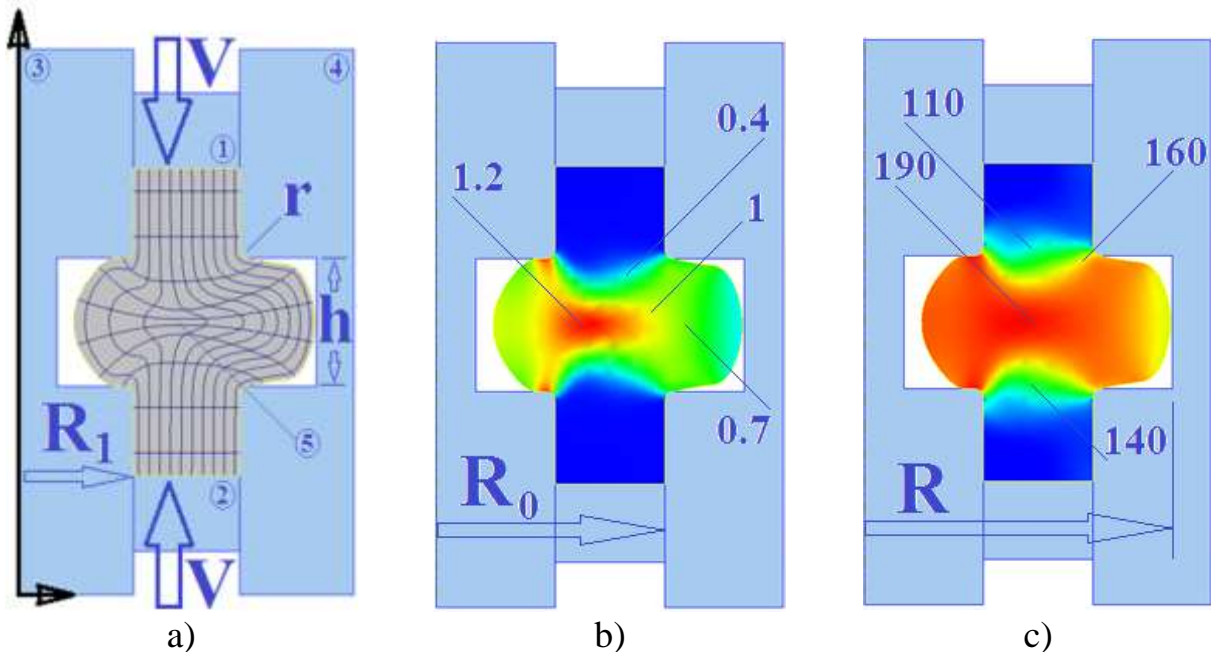
**Члени організаційного комітету** **Антоненко Я.С.,** к.т.н.; **Анциферова О.О.,** к.т.н.;  
**Буховець В.М.,** к.т.н.; **Волошин В.Н.,** к.т.н.;  
**Кобельник В.Р.,** к.т.н.; **Копейкіна М.Ю.,** к.т.н.;  
**Лещук Р.Я.,** к.т.н.; **Сенчишин В.С.,** к.т.н.;  
**Сорокіна Т.О.,** к.т.н.; **Хорошайло В.В.,** к.т.н.;  
**Юрчишин О.Я.,** к.т.н.; **Васильченко Ю.В.**

# SIMULATION OF DOUBLE-ENDED RADIAL EXTRUSION USING QFORM: ANALYSIS OF DEFORMATION MECHANICS

**Abhari P.B., Solianov D.O., Oliinyk D.S.**  
*(DSEA, Kramatorsk, Ukraine)*

Cold forging extrusion is a highly promising metal forming process due to its versatility, efficiency, and ability to accommodate various billet materials and part geometries. As a high-speed, cost-effective method, it enables production of components with different dimensions and mechanical properties while minimizing material waste. Extrusion includes forward, backward, radial, lateral, and combined types, each suited to specific geometries. Radial extrusion is notable for its material flow characteristics. A billet is compressed by opposing upper and lower punches, forcing material radially outward through a fixed die [1]. The double-ended radial extrusion process enhances material utilization and reduces forming loads. The process was analyzed using finite element method (FEM) in QForm 2D. The simulation provides insights into material flow, stress-strain behavior, and die filling. Key outputs include gridline distortion, effective strain distributions, and effective stress fields (Fig. 1).

The die geometry and power mode parameter for the double-ended radial extrusion process with room temperature are as follows (Fig. 1): the radius of billet ( $t = R_0 - R_1$ ,  $R_1/R_0=0,5$ ),  $h/t$  – the flange height to billet radius ratio ( $h/t=1,7$ ),  $r$  – the die fillet ( $r=2\text{mm}$ ),  $V$  – punch velocity ( $V=1\text{mm/s}$ ),  $\mu$  = Zibel's law ( $\mu=0.08$ ), and billet material: AA 6060 aluminium alloy.



1 – upper punch, 2 – lower punch, 3 – right-side die, 4 – left-side die, 5 – deformed part

Fig. 1. Double-ended radial extrusion process: (a) gridline distortion, (b) effective strain distributions, (c) effective stress distributions (MPa).

Fig. 1 presents the simulation results of the double-ended radial extrusion

process conducted using the QForm finite element software. The tooling configuration consists of an upper punch (1), a lower punch (2), a right-side die (3), and a left-side die (4), which together act on the deformed part (5).

The simulation output is analyzed across three critical parameters:

#### **a) Gridline Distortion**

The gridline distortion pattern (Fig. 1a) provides a qualitative visualization of the material flow kinematics within the deformed part. Significant bending and concentration of the gridlines are observed in the radial flow zone. This distortion confirms intensive shear deformation as the material is forced outward by the opposing action of the upper and lower punches.

#### **b) Effective Strain Distributions**

The effective strain distribution (Fig. 1b) reveals the inhomogeneity of plastic deformation. High-strain regions are localized at the contact interfaces with the punches and along the central radial flash line. Conversely, lower strain values are predicted in the core of the part. This distribution indicates that QForm successfully captures the gradient of deformation inherent to radial extrusion.

#### **c) Effective Stress Distributions (MPa)**

The effective stress distribution shown in Fig. 1c (values in MPa) correlates strongly with the strain field. Peak stresses are generated in the deformation zone where the material undergoes severe geometric changes. The QForm simulation accurately predicts the pressure required to initiate radial flow, with the maximum principal stresses concentrated at the billet/die interface and the punch tips.

### **Conclusion of Simulation**

The QForm 2D simulation of the double-ended radial extrusion process successfully captured the material behavior during cold forging. The results presented in Fig. 1 (a–c) provide clear insights into deformation mechanics. Gridline distortion (a) confirms intensive shear deformation and radial material flow caused by opposing upper and lower punches. Effective strain distribution (b) reveals significant strain localization at punch interfaces and along the central flash line, while lower strain values are observed in the core. Effective stress distribution (c) shows peak stresses in high-deformation zones, with maximum values concentrated at the billet-die interface and punch tips. These data indicate that the double-ended configuration enhances material utilization and reduces forming loads compared to single-ended extrusion. The simulation confirms that QForm accurately predicts strain and stress gradients, enabling engineers to optimize punch geometry, die clearance, and process parameters. Overall, the simulation provides a reliable basis for defect prevention, tooling design improvement, and process validation prior to physical manufacturing trials.

**Reference: 1.** Levchenko V., Aliieva L., Abhari P., Malii O., Khasanov K. Promising methods of forming complex profiled parts by precise volume extrusion // Material Forming by Pressure. – 2025. – № 1(54). – C. 87-102. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1\(54\)87](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1(54)87).

# SOME RESULTS OF SOLVING THE GENERALIZED CROSS-INDUSTRY PROBLEM OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PROCESSING GRANULAR MATERIALS IN HEAVY-DUTY DRUM-TYPE MACHINES BASED ON THE ESTABLISHED EFFECT OF SELF-EXCITATION OF AUTO-OSCILLATIONS

<sup>1</sup>Deineka K.Yu., <sup>2</sup>Naumenko Yu.V., <sup>2</sup>Zhabchyk S.V.

(<sup>1</sup>Rivne Technical Vocational College of the National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), Rivne, Ukraine, <sup>2</sup>NUWEE, Rivne, Ukraine)

The main equipment for high-tonnage processing of various granular materials remains a wide cross-industry class of heavy-duty drum-type technological machines with high unit productivity.

The International Patent Classification contains 9 classes corresponding to 9 main types of heavy-duty drum machines: B01J 2/12 – granulators, B01J 8/10 and B01J 19/28 – reactors, B01F 29/60 – mixers, B02C17/00 – mills, B03B 5/56 – washing machines, B07B 1/22 – screens, B24B 31/02 – tumbling machines, F26B 11/04 – dryers, F27B 7/00 – heat treatment machines.

The problem of heavy-duty technological machines of the drum type lies in the high energy intensity of the working process. This is caused by the low intensity of the relative movement of the processed granular medium in the chamber of the rotating drum. A significant proportion of the filling is passive, does not undergo shear deformation and does not participate in the working process.

The generalized cross-industry problem of heavy-duty engineering was solved on the basis of a newly established physical phenomenon. The hydrodynamic effect of self-excitation of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber was discovered. Auto-oscillations are excited due to the loss of stability of the rotating drum vibration system on the verge of establishing a dynamic balance between the action of gravitational and distorted centrifugal force fields on the granular filling. This is accompanied by a mutual transition of the flow regimes of the liquefied granular filling in the chamber – the circulation and wall layer.

The first direct video recording of the auto-oscillating mode of movement of the granular filling of a rotating drum was made in 1966 in a technical video film of the IWF film studio (Göttingen, Germany) [1] (Fig. 1).

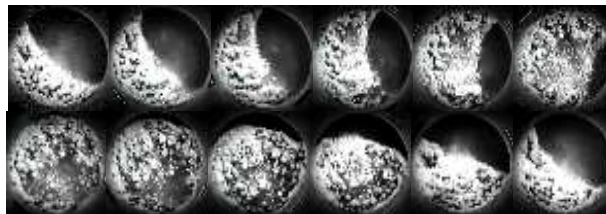


Fig. 1. Sequence of pictures of one period of auto-oscillations of granular filling of the chamber of a laboratory drum mill (according to [1])

Subsequently, the conditions for the stability of the movement of the heavy-duty drum machine unit were established [2], the mechanism for implementing the auto-

oscillating mode of the filling flow was revealed [3], and a model of the conditions and factors for the oscillatory stability of the movement of a two-fraction granular filling was constructed [4]. The influence of the degree of filling of the chamber and the content of the crushed material in the filling on the technological and energy efficiency of the auto-oscillating grinding process in a drum mill was experimentally evaluated [5-8].

It turned out that self-excitation of auto-oscillations allows you to move from a passive mode of implementation of the process of processing granular material to an active intermittent dynamic process based on self-regulation due to feedback without the need for external periodic action. This allows you to sharply intensify and accelerate the process. Auto-oscillations lead to periodic pulsating motion and activate the passive part of the filling and significantly increase the intensity of interaction of particles of the medium with the working body and the medium. The auto-oscillation process is a direction for significantly increasing the energy efficiency of heavy-duty drum machines.

At the first stage of solving the problem of heavy-duty engineering, innovative processes for processing granular materials were created when the drum rotation speed reached the bifurcation value [9-17]. The processes are implemented using a device that contains a drum and a drive with a rotation speed regulator, an elastic element and a recorder of the element's oscillation amplitude. To determine the bifurcation value of the speed, the initial arbitrary drum rotation speed is changed with simultaneous measurement of the amplitude of oscillations of the elastic element until the maximum value of the measurement results is reached.

Recent studies have revealed two qualitatively different modes of self-excitation of fill oscillations – soft and hard (Fig. 2), which significantly affect the implementation of technological processes.

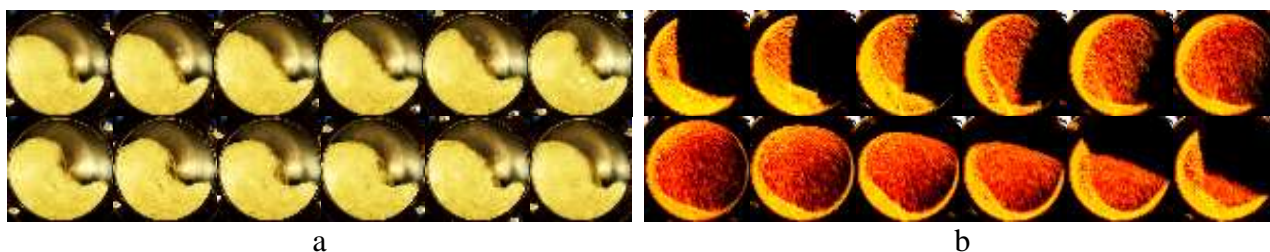


Fig. 2. The obtained pictures of one period of auto-oscillations:  
a – with soft self-excitation, b – with hard self-excitation

In the soft mode, there is a smooth self-excitation of auto-oscillations of the filling of a quasi-harmonic form with a limited range (Fig. 2a). This mode is characterized by monostability, reduced bifurcation values of the drum rotation speed and the dilatancy of the filling in the chamber, and an increased number of pulsations per one drum rotation.

In the rigid mode, there is a jump-like self-excitation of discontinuous relaxation auto-oscillations of filling anharmonic form with a significant range (Fig. 2b). This mode is characterized by bistability, increased range, reduced quality factor, and increased degree of relaxation of auto-oscillations.

At the second stage of solving the problem of heavy-duty engineering, innovative auto-oscillating processes of granulation, washing, classification and mixing in a soft self-excitation mode [18-21] and processes of heat treatment, grinding, drying, reaction and tumbling in a hard self-excitation mode [22-26] were created.

At the third stage of solving the problem of heavy-duty engineering, which is currently under implementation, innovative methods will be created to control the processes of processing granular materials in heavy-duty drum-type technological machines when conducting self-excitation of auto-oscillations in soft and hard modes.

#### References:

1. Both, H.-U. Mahlkörperbewegungen in der Kugelmühle [Motions of Grinding Elements in a Ball Mill]. 1966. IWF (Göttingen). [Video]. (06m:43s–07m:11s) YouTube. <https://doi.org/10.3203/IWF/C-921>
2. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1(163), 60–68. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10>
3. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2022). Revealing the mechanism of stability loss of a two-fraction granular flow in a rotating drum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (EEJET)*, 4, 1(118), 34–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263097>
4. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2025). Mathematical modeling of the rotating drum granular fill flow oscillatory stability. *Vibroengineering Procedia*, 59, 70–81. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25248>
5. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillating of the intrachamber fill. *EEJET*, 1, 1(97), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461>
6. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2019). Establishing the effect of decrease in power intensity of self-oscillation grinding in a tumbling mill with decrease of intrachamber fill. *EEJET*, 6, 7(102), 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291>
7. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2020). Establishing the effect of decreased power intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill when the crushed material content in the intra-chamber fill is reduced. *EEJET*, 4, 1(106), 39–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209050>
8. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2021). Establishing the effect of simultaneous reduction in the filling load inside a chamber and in the content of the crushed material on the energy intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill. *EEJET*, 1, 1(109), 77–87. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224948>
9. Pat. No. UA 154570 U. 2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772317/>
10. Pat. No. UA 154571 U. 2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772392/>
11. Pat. No. UA 154576 U. 2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772369/>
12. Pat. No. UA 155100 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780373/>
13. Pat. No. UA 155101 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780416/>
14. Pat. No. UA 157163 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1817657/>
15. Pat. No. UA 157220 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818458/>
16. Pat. No. UA 157608 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826073/>
17. Pat. No. UA 157646 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826100/>
18. Pat. No. UA 157868 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1831400/>
19. Pat. No. UA 158069 U. 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1834666/>
20. Pat. No. UA 158585 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1843634/>
21. Pat. No. UA 158884 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1849725/>
22. Pat. No. UA 158810 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1846648/>
23. Pat. No. UA 159078 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852548/>
24. Pat. No. UA 159087 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852588/>
25. Pat. No. UA 159719 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1862711/>
26. Pat. No. UA 160006 U. 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1868220/>

# ENERGY-ASSISTED CUTTING–UPSETTING OF PRECISION WORKPIECES

**Karnaukh S. H.**

(DSEA, Kramatorsk, Ukraine)

The efficiency of manufacturing finished parts is largely determined by the quality of workpieces produced during the initial separation process. This quality is defined as a complex parameter encompassing geometric accuracy, surface integrity, and the metallurgical state of the cut ends and adjacent zones [1]. The separation stage was modeled theoretically based on the two-support shearing scheme. The corresponding finite element model is shown in Fig. 1, a: 1 – moving knife, 2 – body, 3 – sample.

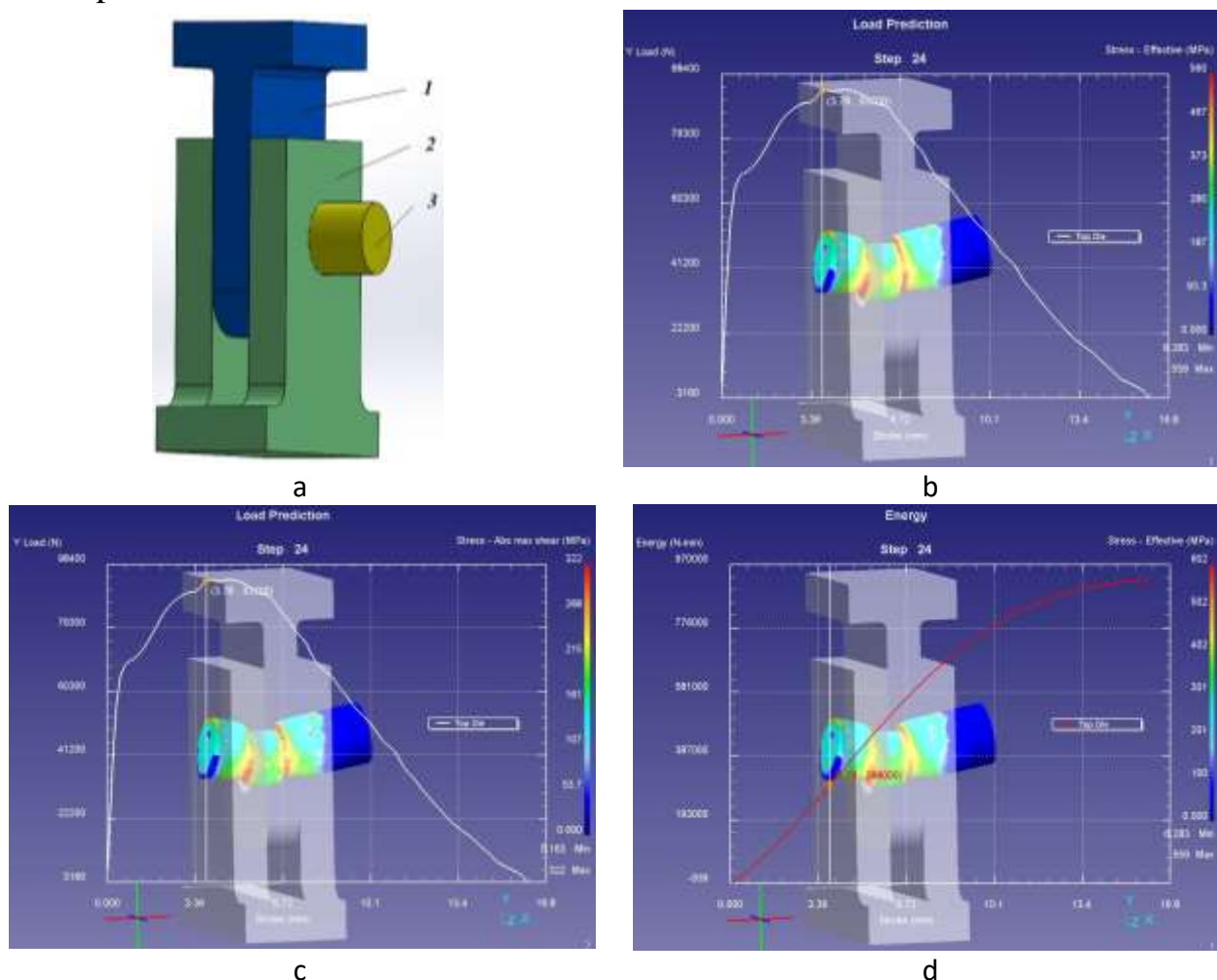


Fig. 1. Deformation force vs. punch stroke at  $V = 1 \text{ mm/s}$  for an AISI 1006 steel specimen: (a) finite element model, (b) stress intensity, (c) maximum shear stress, (d) work of deformation.

The initial data for the simulation included the die design, the initial workpiece geometry, equipment characteristics (load parameters), and process temperature. For the simulation, specimens with dimensions of  $d = 16 \text{ mm}$ ,  $l = 40 \text{ mm}$  made of AISI 1006 ( $\sigma_s = 305 \text{ MPa}$ ) steel were used. For simulations such as validation and

optimization of manufacturing operations, the friction coefficient is a critical parameter. The calculations used friction conditions defined by Seibel's law for «cold forming (steel dies)» with a coefficient of 0.12 [2]. The simulation was configured as a 3D problem in the DEFORM preprocessor. The following numerical settings were applied: the *Conjugate Gradient* solver with a direct iterative method and the *Normalized Cockroft & Latham* damage criterion for the calculation type [3]. The evaluation was carried out according to the following criteria: maximum shear stresses, mean stresses, and strain intensity. The results of the simulation are presented in Fig. 1, b-d.

Analysis of the results shows that the maximum separation force,  $F_y = 93700\text{ N}$ , was reached at *step 24* with a punch stroke of  $h = 3,78\text{ mm}$ , corresponding to a deformation work of  $A = 298\text{ J}$ .

The deformation stage was modeled theoretically based on the longitudinal upsetting scheme. The corresponding finite element model is shown in Fig. 2, a: 1 – punch, 2 – die, 3 – simple workpiece.

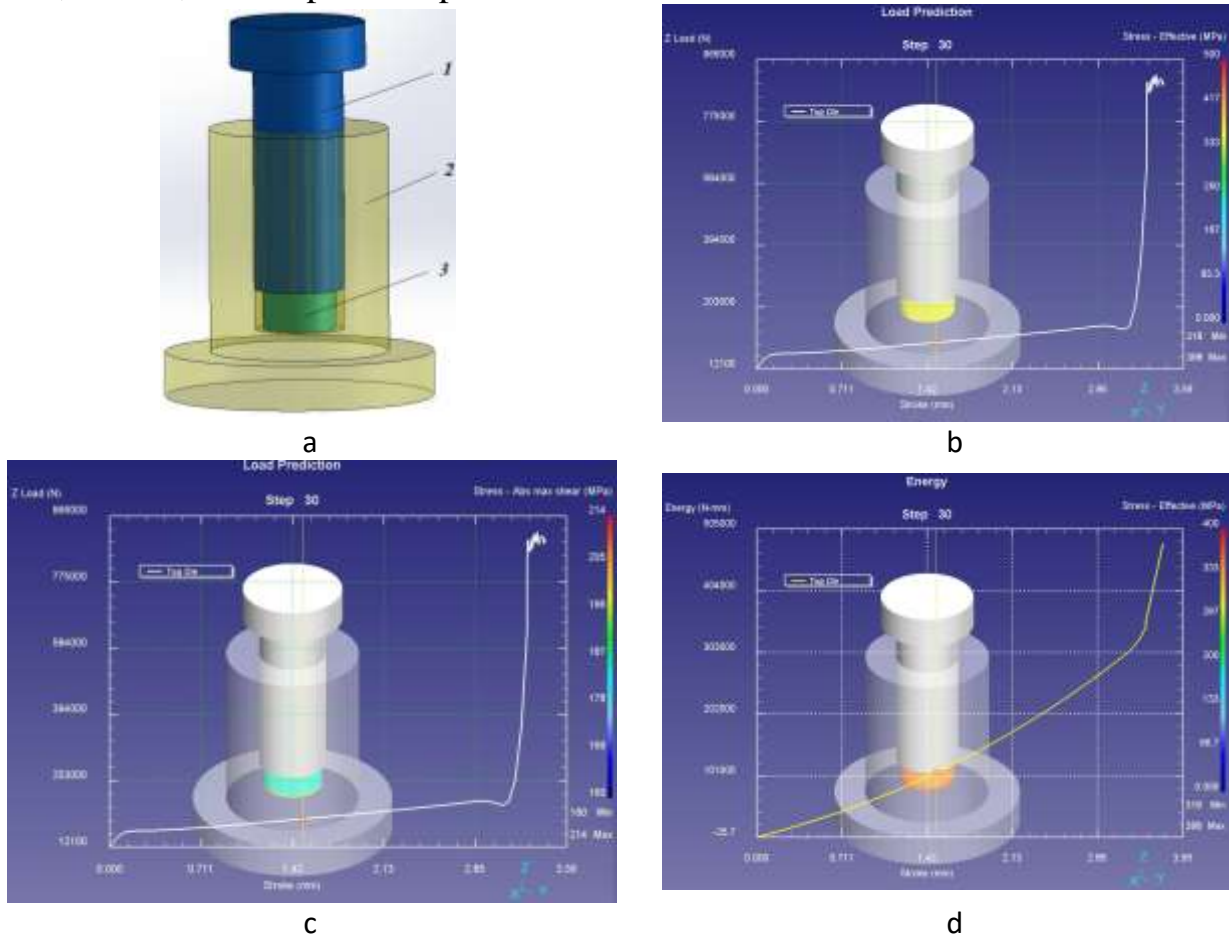


Fig. 2. Deformation force vs. punch stroke at  $V = 2\text{ m/s}$  for an *AISI 1006* steel simple workpiece: (a) finite element model, (b) stress intensity, (c) maximum shear stress, (d) work of deformation.

Initial simulation data comprised the die design, initial workpiece geometry, equipment characteristics (loading parameters), and process temperature. For the simulation, cut-off blanks from the previous stage with dimensions of  $d = 16\text{ mm}$ ,  $l = 9\text{ mm}$  made of *AISI 1006* ( $\sigma_s = 305\text{ MPa}$ ) steel were used. The cut blank was modeled as an ideal cylinder, as creating geometry with actual geometric deviations

(such as edge slope) is technically difficult in software. It was assumed that the deformation work for real blanks would be less than for this idealized model. For process validation and optimization simulations, the friction coefficient is a critical parameter. The calculations employed friction conditions defined by Seibel's law for «cold forming (steel dies)» with a coefficient of  $\mu = 0.12$  [3]. The simulation results are shown in Fig. 2, b-d.

The calculation results are summarized in Table 1.

Table 1 – Calculation results

$h, mm$	$F_z, N$	$A, J$
0.5	62700	29
1.0	76400	64
1.5	93000	107
2.0	110000	158

A comparison of theoretical and experimental results for the separation and longitudinal upsetting stages is shown in Fig. 3. The deviation between simulation and experiment is less than 5% (Fig. 3, a, b). During the deformation stage (Fig. 3, b, curve 2), the experimental  $F-h$  curve shifts to the right due to the deformation of geometric defects inherited from separation. This is due to the fact that the simulation used an idealized workpiece geometry, whereas real workpieces have inherent defects. An analysis of the results, conducted by comparing the deformation work at two stages: two-support cutting ( $A = 298 J$ ) and longitudinal upsetting ( $A = 158 J$ ), shows that the press unloading energy is sufficient only for partial correction of the workpiece shape. This partial correction corresponds to a punch stroke of  $h = 2 mm$ . However, producing high-precision blanks with tight control over volume, shape, and dimensions cannot be achieved using the press's own unloading energy alone. It is evident that implementing such demanding processes requires modernized press systems equipped with additional energy sources and dies for combined operations.

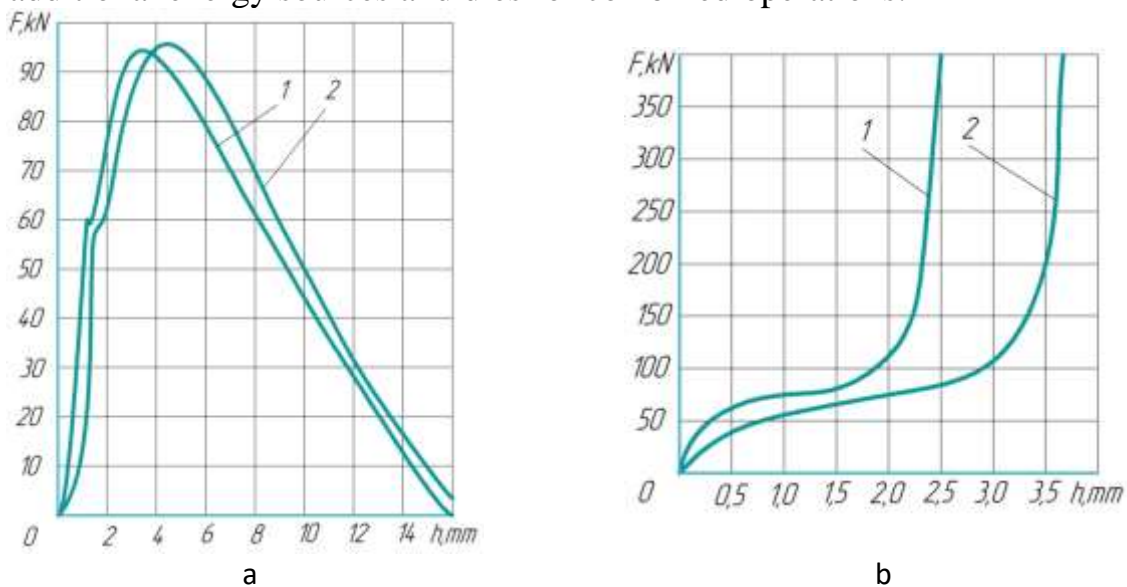


Fig. 3. Comparison of theoretical and experimental results for the stages of separation (a) and longitudinal upsetting (b): 1 – modeling (theory), 2 – experiment.

## **Conclusions:**

1. The accuracy of blanks for stamping and extrusion directly depends on the production technology of the rolled material and its dimensional tolerances. To achieve the specified accuracy of volume, shape, and size, it is advisable to use integrated separation processes that combine the stages of blank separation and plastic deformation.

2. The separation process is accompanied by an immediate load release, which leads to a pulsed release of accumulated elastic energy. The essence of the proposed approach is to convert the «harmful» energy of elastic deformation of the press into useful work of plastic deformation during the blank shape improvement stage.

3. Theoretical and experimental studies have shown that the ratio of two-support cutting to longitudinal upsetting work is approximately 53%. This amount of energy is sufficient for partial shape correction and improved geometric accuracy of workpieces. However, it is insufficient for producing high-precision workpieces with strict control of all parameters.

## **References:**

1. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Hrudkina N. S. Selecting a cutting method for workpieces before stamping using synergetic fracture criteria and a deformability limit determination technique for separating processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129. 5447–5455, <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12627-z>.

2. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 109. 9–12. 2457–2464, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7>

3. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliiev I. S., Stankov V. U. Cutting of rolled metal with a stress concentrator marked by the elastic deformation of the press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. 136. 3791–3801, <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15043-7>.

# APPLICATION OF THIN HARD COATINGS TO THE CONTACT SURFACES OF THE LOADING COUPLING OF A HIGH-SPEED FZG-TYPE TEST RIG

**<sup>1</sup>Roman Protasov, PhD., Ing., Mgr., assistant professor**

**<sup>1</sup>Juraj Ondruška, PhD., Ing., associate professor**

**<sup>2</sup>Votontsov Borys, DSc., professor**

**<sup>3</sup>Bondarenko Oleksiy, CSc., associate professor**

**<sup>3</sup>Ustynenko Oleksandr, CSc., associate professor**

**<sup>3</sup>Vorontsov Serhii, CSc., associate professor**

*(<sup>1</sup>Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia, <sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, <sup>3</sup>National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”)*

The back-to-back test rig, governed by the ISO 14635 series of standards, constitutes an effective tool for the tribological testing of gear pairs with respect to scuffing and fatigue pitting. The circulation of a constant torque within the closed power loop is achieved through the elastic preload twist of a torsion shaft, which is imposed by means of a loading coupling.

The transition to elevated rotational speed regimes (10,000–22,000 rpm), required for the testing of electric-vehicle transmissions, reveals fundamental limitations of the conventional loading coupling design – a massive, large-diameter flanged assembly secured by a substantial number of clamping bolts. The principal drawbacks of this design are a pronounced residual imbalance and the resulting high centrifugal loads at elevated rotational speeds, together with the low static friction coefficient of the steel-on-steel interface ( $\mu \approx 0.12\text{--}0.20$ ), which necessitates an increase in the contact area and in the number of clamping bolts.

As a prospective solution, the deposition of a thin hard TiAlN coating onto the mating contact surfaces of both coupling halves by means of physical vapor deposition (PVD) is proposed. The principal characteristics of this coating include a

microhardness of 25–35 GPa, an elevated coefficient of friction against steel ( $\mu \approx 0.4$ –0.8) and a small coating thickness (2–5  $\mu\text{m}$ ), which has no appreciable influence on the balancing of the assembly.

It should be emphasized that, in the present application, the coating is deposited with the explicit objective of increasing the coefficient of friction within the stationary frictional interface between the coupling halves, and of raising the admissible contact pressure within this interface owing to the high hardness of the coating. As a consequence, it becomes feasible to reduce the diameter of the coupling while maintaining the same transmitted torque (up to 600 N·m), which in turn leads to a quadratic reduction of the centrifugal forces and of the sensitivity of the assembly to residual imbalance, and additionally permits a reduction in the number of clamping bolts and a simplification of the balancing procedure.

Further investigations envisage the numerical simulation of the operation of the coupling, accounting for both the variation of the frictional contact at different values of  $\mu$  and the introduction of novel geometries of the contact surfaces. In a subsequent stage, an experimental verification of the static friction coefficient within the TiAlN–TiAlN tribological pair is to be performed, along with an assessment of the balance quality grade of the size-reduced coupling in accordance with ISO 1940. The implementation of the proposed solution may constitute one of the key elements in the design justification of a prospective high-speed FZG test rig.

**Acknowledgment.** The research presented in this paper is an outcome of the project VEGA No. 1/0708/24“Research on the design parameters of the high-speed spinning spindle of the progressive concept” funded by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science, research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences and APVV-24-0641.

# ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСУ МАСОВОГО НАЙМУ ПЕРСОНАЛУ ЯК СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

**Авраменко К., Самойленко А.**

*(Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна)*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних умовах стрімкої цифровізації економіки та жорсткої конкуренції на ринку праці, ефективне управління людськими ресурсами стає одним із головних чинників фінансового успіху будь-якого підприємства. Особливе місце в системі HR-менеджменту посідає процес масового набору (рекрутингу). Для великих корпорацій, ритейлу та компаній сфери послуг масовий підбір працівників є неперервним та ресурсомістким процесом. Неefективна організація найму, коли вхідний потік резюме значно перевищує пропускну здатність HR-відділу, тягне за собою виникнення «вузьких місць» (bottlenecks). Це призводить до утворення довгих черг з необроблених заявок, перевантаження рекрутерів та невідвотної втрати талановитих кандидатів через тривале очікування зворотної комунікації. Тому оптимізація пропускну здатності рекрутингової воронки є важливим практичним завданням для сучасного бізнесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематиці управління бізнес-процесами та системного аналізу присвячено праці багатьох вітчизняних та зарубіжних науковців. Теоретичні засади імітаційного моделювання ґрунтовно розкрито в працях В. Кельтона, А. Лоу [1] та В. Томашівського [2]. Водночас аналіз існуючих підходів до планування потреби в HR-персоналі показує, що більшість підприємств досі використовують традиційні детерміновані методи розрахунку на базі усереднених нормативів часу. Проте поведінка кандидатів на ринку праці має яскраво виражений стохастичний (випадковий) характер. Аналітичний розрахунок багатофазних систем із випадковими відмовами та неекспоненціальними законами розподілу часу обслуговування за допомогою класичних математичних формул є надзвичайно складним [3]. Невирішеною частиною загальної проблеми залишається брак адаптивних програмних моделей, які б дозволяли HR-менеджерам динамічно тестувати конфігурації штату в умовах випадкових коливань потоку кандидатів.

**Формулювання цілей доповіді (постановка завдання).** Метою даного дослідження є розробка та програмна реалізація імітаційної моделі бізнес-процесу масового набору персоналу у вигляді багатофазної системи масового обслуговування для виявлення прихованих «вузьких місць» та оптимізації завантаженості співробітників HR-відділу.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** З точки зору системного аналізу, процес масового найму було формалізовано як багатоканальну багатофазну систему масового обслуговування (СМО) з відмовами. Архітектура розробленої моделі передбачає проходження транзактом (кандидатом) трьох послідовних фаз обслуговування: первинний скринінг резюме (здійснюється ресурсом HR\_Screeners), співбесіда з HR-спеціалістом (HR\_Interviewers) та фінальна технічна співбесіда (Tech\_Experts).

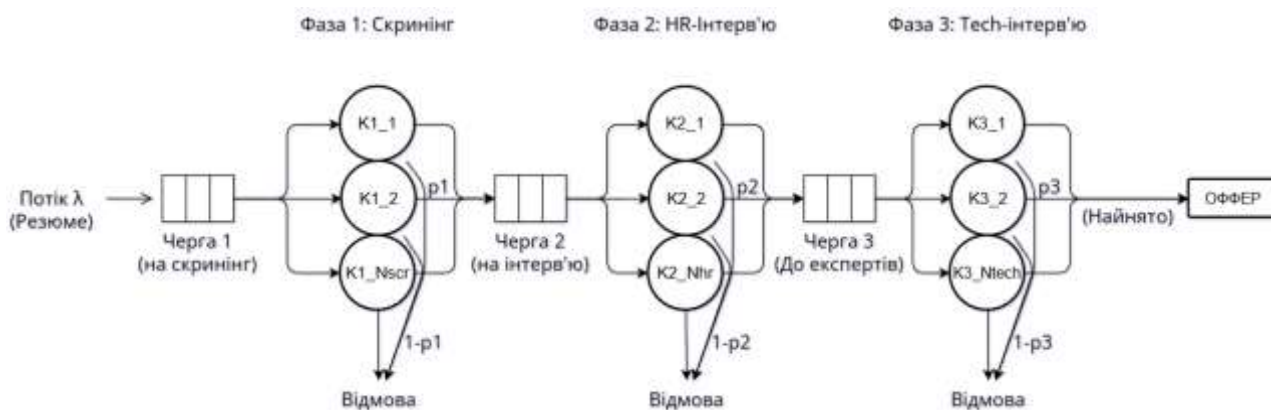


Рис. 1. Концептуальна Q-схема процесу масового найму як багатофазної системи масового обслуговування

Вхідний потік заявок моделюється за пуассонівським розподілом з інтенсивністю  $\lambda$ . Час обробки заявки на першому етапі задано рівномірним законом розподілу, а на етапах інтерв'ю — нормальним законом із заданим математичним очікуванням та дисперсією. На кожній фазі існує ймовірність відсіву кандидата  $(1 - p_i)$ , що відповідає реальній конверсії рекрутингової воронки.

Для програмної реалізації моделі було застосовано об'єктно-орієнтований підхід із використанням мови програмування Python та спеціалізованого фреймворку дискретно-подійного моделювання SimPy. На відміну від детермінованого моделювання з фіксованим кроком, системний годинник SimPy стрибкоподібно переміщується між критичними подіями, що забезпечує високу продуктивність обчислень. Для агрегації та обробки вихідної статистики було використано бібліотеку Pandas, а для візуалізації результатів — Matplotlib.

У ході дослідження було проведено базовий імітаційний експеримент, що охоплював 160 модельних годин (один робочий місяць). Конфігурація системи складалася з 2 спеціалістів на скринінгу, 2 HR-менеджерів та 1 технічного експерта. За інтенсивності вхідного потоку 0,5 заявок на годину система згенерувала 75 транзактів-кандидатів.

Згідно з отриманими результатами, до фінального етапу (отримання Job Offer) дійшло лише 9 осіб, що становить 12,0% від початкового потоку. Основний відсів відбувся на етапах первинного скринінгу (31 кандидат) та HR-інтерв'ю (28 кандидатів).

Особливу увагу було приділено динамічному моніторингу довжини черг, результати якого подано на рис. 2.

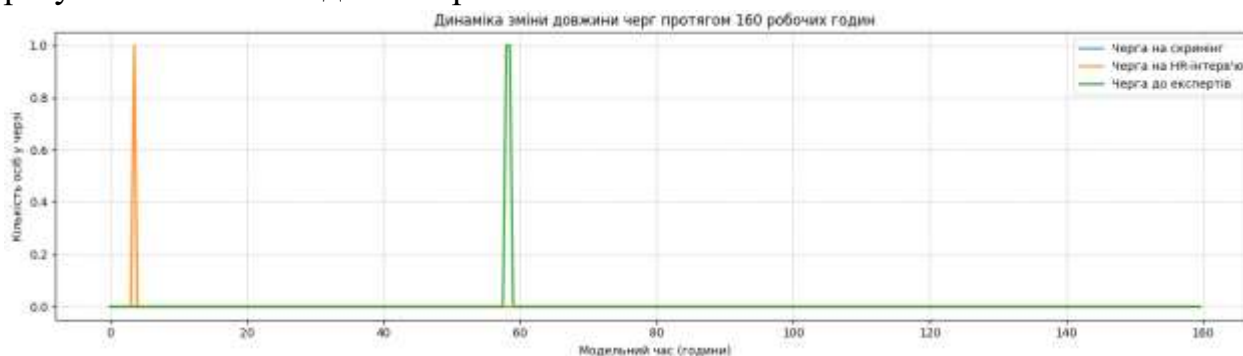


Рис. 2. Динаміка зміни довжини черг кандидатів за фазами рекрутингу

Візуальний аналіз динаміки системи дозволив ідентифікувати, що середній час очікування на скринінг та технічну співбесіду наближається до нуля, що свідчить про надмірну або достатню кількість каналів. Однак найбільш вразливою ланкою (вузьким місцем) виявилася друга фаза — HR-інтерв'ю. Через стохастичні згущення вхідного потоку на цьому етапі спостерігалися критичні пікові навантаження, де час очікування окремих кандидатів у черзі сягав 0,78 модельної години (майже 47 хвилин).

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку в даному напрямку.** Розроблена програмна імітаційна модель довела свою адекватність і дозволила детально дослідити динаміку процесу масового найму. На основі отриманих результатів обґрунтовано управлінське рішення: існуюча штатна структура (2:2:1) є незбалансованою. Для усунення виявленого «вузького місця» без збільшення загального фонду оплати праці, компанії рекомендовано автоматизувати етап первинного скринінгу резюме (наприклад, через впровадження ATS-систем), вивільнивши ресурс співробітників для проведення HR-інтерв'ю. Перспективою подальших досліджень є інтеграція в розроблену модель алгоритмів машинного навчання для динамічного прогнозування коефіцієнтів конверсії на основі історичних даних компанії.

#### Література:

1. Кельтон В., Лоу А. Імітаційне моделювання. Класика CS. Київ : Видавнича група BHV, 2004. 847 с.
2. Томашівський В. Р. Імітаційне моделювання систем : навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. 256 с.
3. Бень А. П. Об'єктно-орієнтоване програмування складних систем : навч. посіб. Київ : Наукова думка, 2015. 288 с.

# УНІФІКОВАНА АРХІТЕКТУРА ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗАДАЧАМИ У СЕРЕДОВИЩА РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІГРОВІ РУШІЇ

**Баркова С.О., Алтухов В.О.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасна розробка програмного забезпечення характеризується високим рівнем розподілу управлінської та інженерної діяльності між різними інструментальними середовищами. Управління задачами здійснюється у спеціалізованих системах (Jira, Trello, Linear, Asana), тоді як безпосередня робота над продуктом відбувається в інтегрованих середовищах розробки та, у випадку ігрової індустрії, в ігрових рушіях. Така відокремленість призводить до постійної ручної синхронізації стану задач зі станом коду, зростання накладних витрат на супровід процесу та підвищення впливу людського фактору на актуальність управлінської інформації. Дослідження сприйняття продуктивності розробниками засвідчують, що часті переривання та перемикання контексту між інструментами негативно впливають на ефективність роботи [1]. Кількісні оцінки впливу перемикання задач на процеси розробки підтверджують суттєві втрати продуктивності, пов'язані з фрагментацією робочого процесу [2].

Особливо гостро ця проблема постає у галузі розробки ігор, де ключовими артефактами є не лише вихідний код, а й доменні об'єкти ігрового рушія — сцени, префаби, матеріали та інші ассети. Наявні рішення інтеграції систем управління задачами зосереджені на одній екосистемі середовища розробки та оперують переважно текстовими файлами і подіями систем контролю версій, не враховуючи специфіку артефактів ігрових рушіїв.

Метою роботи є розробка уніфікованої архітектури інтеграції систем управління задачами у різноманітні середовища розробки, що забезпечує автоматизовану актуалізацію стану проєкту на основі зв'язку управлінських сутностей з артефактами розробки. Запропонований підхід орієнтований на зменшення накладних витрат на синхронізацію та підвищення достовірності управлінської інформації.

Проаналізовано наявні інструменти інтеграції управління задачами в середовища розробки, зокрема розширення для Visual Studio Code, Visual Studio, JetBrains Rider, а також механізми зв'язування задач із подіями систем контролю версій. Визначено їх спільне обмеження — прив'язку до окремої екосистеми та відсутність підтримки доменних артефактів ігрових рушіїв.

Запропоновано архітектурну модель, побудовану за принципом тонких клієнтів навколо незалежного ядра, за аналогією з Language Server Protocol. Ядро виступає єдиним джерелом істини щодо стану задач та зберігає модель зв'язків «задача — артефакт», є інваріантним щодо конкретного середовища. Взаємодія ядра з клієнтами здійснюється через уніфікований протокол, що дозволяє підключати адаптери як для середовищ розробки (Visual Studio Code, Visual Studio, Rider), так і для ігрових рушіїв (Unity, Unreal Engine, Godot). Адаптери ігрових рушіїв забезпечують зв'язування задач з доменними артефактами, недоступними на рівні текстового представлення коду.

Як другорядний результат розглянуто метод автоматичного зв'язування задач з артефактами розробки. Запропоновано гібридний підхід, що поєднує автоматичне виявлення кандидатів на основі сигналів системи контролю версій та середовища розробки з ранжуванням релевантності за частотою змін і обсягом модифікацій та можливістю підтвердження зв'язку розробником. Подібні задачі відновлення зв'язків трасування між артефактами програмного забезпечення активно досліджуються у сучасній інженерії програмного забезпечення [3]. Такий підхід дозволяє знизити обсяг ручної праці без втрати точності управлінської інформації.

Очікуваним результатом є прототип, що реалізує запропоновану архітектуру на парі середовищ Visual Studio Code та Unity як підтвердження працездатності моделі. Подальші напрями досліджень охоплюють розширення множини підтримуваних середовищ розробки та ігрових рушіїв, формалізацію протоколу взаємодії, а також дослідження механізмів синхронізації стану в умовах командної роботи через локальний агент та опціональний сервер синхронізації.

#### **Література:**

1. Meyer A. N., Fritz T., Murphy G. C., Zimmermann T. Software developers' perceptions of productivity. Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2014). Hong Kong, China, 2014. P. 19–29. DOI: 10.1145/2635868.2635892.
2. Tregubov A., Rodchenko N., Boehm B., Lane J. A. Impact of task switching and work interruptions on software development processes. Proceedings of the 2017 International Conference on Software and System Process (ICSSP 2017). Paris, France, 2017. P. 134–138. DOI: 10.1145/3084100.3084116 .
3. Gao H., Kuang H., Sun K., Ma X., Egyed A., Mäder P., Rempel P., Lü J. TRIAD: automated traceability recovery based on biterm-enhanced deduction of transitive links among artifacts. Proceedings of the IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering (ICSE 2024). Lisbon, Portugal, 2024. DOI: 10.1145/3597503.3639164 .

# АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІНСЬКИХ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ІНСТРУМЕНТАРІЮ CI/CD ТА МЕТРИК DEVOPS

**Баркова С.О., Калюженко В.В.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Управління процесами розробки програмного забезпечення традиційно спирається на суб'єктивні оцінки стану команди та проекту, які формуються на основі досвіду й інтуїції керівника. Такий підхід ускладнює об'єктивне виявлення вузьких місць процесу, ускладнює порівняння ефективності в часі та підвищує ризик ухвалення управлінських рішень на підставі неповної або викривленої інформації. Водночас сучасна інженерна практика накопичує значний обсяг об'єктивних даних про процес розробки у системах контролю версій, конвеєрах безперервної інтеграції та доставки (CI/CD) і системах моніторингу. Перспективним напрямом є перехід від суб'єктивного управління до управління на основі вимірюваних показників. Дослідницька програма DevOps Research and Assessment визначила чотири ключові метрики ефективності постачання програмного забезпечення – частоту розгортань, час від внесення зміни до її розгортання, частку невдалих змін та час відновлення працездатності, які корелюють з організаційною ефективністю. Подолання цього обмеження потребує автоматизованого вилучення показників безпосередньо з даних систем контролю версій та конвеєрів CI/CD.

Метою роботи є розробка підходу до автоматизації управлінських процесів розробки програмного забезпечення шляхом неперервного обчислення метрик DevOps з технічних артефактів процесу та їх перетворення на інструмент підтримки управлінських рішень. Завданнями роботи є аналіз наявних метрик ефективності розробки, побудова моделі вилучення показників з подій систем контролю версій та CI/CD, а також визначення зв'язку між інженерними метриками й управлінською ефективністю команди. Запропоновано підхід, що передбачає автоматизований збір подій процесу розробки (фіксації змін, складання, тестування, розгортання, інциденти) та обчислення на їх основі ключових метрик у неперервному режимі без додаткового навантаження на учасників процесу. Наукова новизна полягає у формалізації зв'язку між технічними сигналами процесу розробки та управлінськими показниками ефективності, що дозволяє розглядати інженерну автоматизацію як безпосередній інструмент управління, а не лише як технічну практику.

Очікуваним результатом є модель та прототип системи неперервного обчислення метрик DevOps, інтегрованої з конвеєром CI/CD, що надає керівникові об'єктивну картину стану процесу розробки. Подальші напрями досліджень охоплюють розширення набору показників, дослідження їх прогностичної здатності щодо ризиків проекту, а також аналіз впливу впровадження вимірюваного управління на ефективність і добробут команди розробників.

## ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ АВТОКОЛИВАНЬ

**Бень Ю.Є.**

(НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

Актуальність дослідження впливу регенеративних коливань на якість обробленої поверхні визначається зростанням вимог сучасного машинобудування до надійності, довговічності та стабільності експлуатаційних властивостей деталей. Це особливо важливо в контексті розвитку функціонально-орієнтованих технологій машинобудування, які передбачають не лише забезпечення заданої точності розмірів і форми, а й цілеспрямоване формування поверхневого шару з наперед визначеними фізико-механічними характеристиками. У такому підході якість поверхні розглядається як один із ключових чинників працездатності виробу, оскільки вона впливає на втомну міцність, зносостійкість, контактну жорсткість і ресурс деталей.

У поданій моделі миттєва товщина зрізу описується залежністю:

$$h(t) = f_z + x(t - \tau) - x(t),$$

де  $h(t)$  — миттєва товщина зрізу, мм;  $f_z$  — подача на зуб, мм/зуб;  $x(t)$  — поточне переміщення інструмента або заготовки, мм;  $x(t - \tau)$  — переміщення системи під час попереднього проходу зуба;  $\tau$  — часове запізнення між проходами зуба.

Оскільки в реальному процесі інструмент не може зрізати шар матеріалу від'ємної товщини, у програмній реалізації використано фізичне обмеження:

$$h(t) = \max(0, f_z + x(t - \tau) - x(t)).$$

Це означає, що у випадку втрати контакту різальної кромки із заготовкою або за умов, коли розрахована товщина зрізу стає від'ємною, сила різання приймається рівною нулю або суттєво зменшується. Таке обмеження підвищує фізичну достовірність моделі, хоча й залишається спрощеним представленням реального контакту інструмента з матеріалом.

Часове запізнення між послідовними проходами зубів визначається формулою:

$$\tau = \frac{60}{nz},$$

де  $n$  — частота обертання шпинделя, об/хв;  $z$  — кількість зубів або різальних крайок.

Технологічна система «верстат — пристрій — інструмент — заготовка» є складною багатомасовою системою з багатьма власними частотами, формами

коливань і напрямими податливості. Однак для попереднього аналізу її часто подають у вигляді одномасової системи з одним домінуючим коливальним контуром. Такий підхід дає змогу пояснити основні закономірності виникнення автоколивань і оцінити вплив параметрів режиму різання. [2, 3, 13]

Основне рівняння руху одномасової системи має вигляд:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t),$$

де  $m$  — приведена маса системи, Н·с<sup>2</sup>/мм;  $c$  — коефіцієнт демпфування, Н·с/мм;  $k$  — жорсткість системи, Н/мм;  $F(t)$  — сила різання, Н;  $x$  — переміщення, мм;  $\dot{x}$  — швидкість, мм/с;  $\ddot{x}$  — прискорення, мм/с<sup>2</sup>.

Власна кругова частота системи визначається як:

$$\omega_n = 2\pi f_n,$$

де  $f_n$  — власна частота системи, Гц.

Приведена маса визначається через жорсткість і власну кругову частоту:

$$m = \frac{k}{\omega_n^2}.$$

Коефіцієнт демпфування визначається формулою:

$$c = 2\zeta m\omega_n,$$

де  $\zeta$  — відносний коефіцієнт демпфування.

Сила різання у спрощеній моделі приймається пропорційною питомій силі різання, глибині або ширині різання та миттєвій товщині зрізу:

$$F(t) = K_c b h(t),$$

де  $K_c$  — питома сила різання, Н/мм<sup>2</sup>;  $b$  — глибина або ширина різання, мм.

Після підстановки регенеративної залежності для товщини зрізу отримуємо рівняння із запізненням:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = K_c b [f_z + x(t - \tau) - x(t)].$$

Саме наявність члена  $x(t - \tau)$  перетворює задачу на задачу із запізненням у зворотньому зв'язку. Це принципово важливо, оскільки поточна сила різання залежить не лише від поточного стану системи, а й від її попереднього стану.

Для попередньої оцінки стійкості використовується динамічна податливість системи:

$$H(j\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + jc\omega}.$$

Динамічна податливість показує, наскільки система зміщується під дією гармонічної сили заданої частоти. Поблизу власної частоти податливість різко зростає, тому навіть порівняно невелика змінна сила різання може спричинити значні коливання.

Частота проходження зубів визначається залежністю:

$$f_{zp} = \frac{nz}{60}.$$

Відповідна кругова частота проходження зубів:

$$\omega = 2\pi f_{zp} = 2\pi \frac{nz}{60}.$$

Якщо дійсна частина податливості є від'ємною,

$$\operatorname{Re}(H(j\omega)) < 0,$$

то критична глибина різання у спрощеному наближенні визначається як:

$$b_{lim} = -\frac{1}{2K_c \operatorname{Re}(H(j\omega))}.$$

Умова стійкості має вигляд:

$$b < b_{lim}.$$

Якщо фактична глибина або ширина різання менша за критичну, режим вважається стійким. Якщо ж  $b > b_{lim}$ , процес має підвищений ризик розвитку автоколивань.

Водночас потрібно зазначити, що ця оцінка є спрощеною. Для повноцінної побудови діаграм стійкості потрібно враховувати не лише частоту проходження зубів, а й можливу частоту самих автоколивань, яка зазвичай близька до власної частоти системи. У точнішій постановці аналізують фазову умову регенеративного процесу та будують діаграми стійкості типу *stability lobe diagram*. [1-4]

### Література:

1. Altintas Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Annals. 1995. Vol. 44, № 1. P. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
2. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., Stepan G. Chatter suppression techniques in metal cutting. CIRP Annals. 2016. Vol. 65, № 2. P. 785–808. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.
3. Insperger T., Stepan G. Semi-discretization method for delayed systems. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2002. Vol. 55, № 5. P. 503–518. DOI: 10.1002/nme.505.
4. Insperger T., Stepan G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2004. Vol. 61, № 1. P. 117–141.

## ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕДУКТОРІВ РІЗАННЯ ОЧИСНИХ ВУГІЛЬНИХ КОМБАЙНІВ В УМОВАХ ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

<sup>1</sup> Бережной Р.А., <sup>1</sup> Дергоусов В.М., <sup>2</sup> Пермяков О.А.

(<sup>1</sup> АТ «ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД «КОРУМ СВІТЛО ШАХТАРЯ», м. Харків, Україна, <sup>2</sup> НТУ «ХП», м. Харків, Україна)

Мета роботи - на основі системного аналізу особливостей видобутку вугілля, технічних вимог до створення відповідальних вузлів, що забезпечують ефективність роботи очисних вугільних комбайнів нового покоління, організаційно-технологічних можливостей заводу розглянути та впровадити технологічні новації, які забезпечують якість та підвищення надійності і ресурсу, зменшення рівнів шуму, знижують трудомісткість виготовлення зубчастих передач та складання редукторів різання.

Видобувний гірничий комбайн (очисний комбайн) — комбінована гірнична машина, яка одночасно виконує операції руйнування пласта корисної копалини та навантаження відбитої маси на конвеєр. Більшість конструкцій вузькозахватних сучасних очисних комбайнів, призначених для виїмки вугільних пластів із кутами падіння 0-35°, мають виконавчі органи у вигляді шнеків з різцями. Шнек забезпечує в складі очисних комбайнів функції відділення вугілля від масиву й навантаження відділеної гірничої маси на вибійний конвеєр (рис.1).

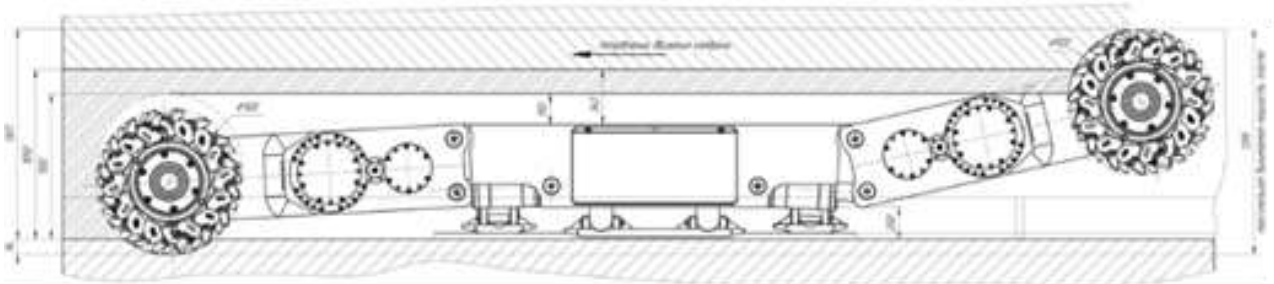


Рис. 1. Схема роботи очисного комбайну при повному діапазоні вийманої потужності

Проведені науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи дозволили створити високоефективну конструкцію очисного комбайна УКД200-500 з техніко-економічними показниками на рівні і краще світових зразків та забезпечити його серійне виробництво з гарантією стабільної якості, високій продуктивності та зниження трудомісткості виготовлення. Комбайн очисний УКД200-500 призначений для механізованого вилучення вугілля у складі очисних комплексів, в очисних вибоях пологих і похилих пластів потужністю 0,85-1,5м, що рухаються по простяганню з кутами нахилу до 35°, а також по повстанню та падінню з кута 10°, при опірності вугілля різанню до 480 кН/м. Очисний комбайн УКД200-500 є універсальною машиною, яка може працювати у складі множини очисних комплексів. Компоновку комбайна УКД200-500 наведено на рис.2.

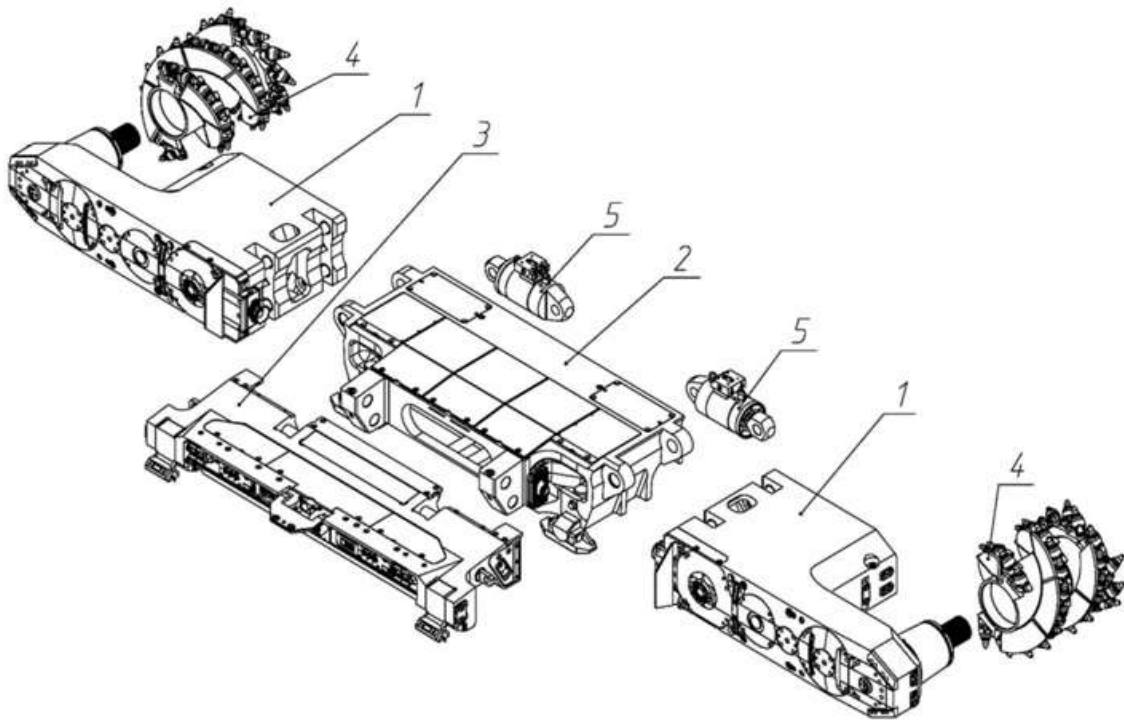


Рис. 2 Компоновка очисного комбайна УКД200-500

1 - Ріжуча частина; 2 - Рама; 3 - Портал; 4 - Шнековий виконавчий орган (лівий/правий);  
5 - Гідродомкрат

Ріжуча частина (редуктор різання) очисного комбайна УКД200-500 (рис.3) є уніфікованою, що дозволяє встановлювати її як з лівого, так і з правого боку рами, є триступневим редуктором з електродвигуном.



Рис. 3 Ріжуча частина очисного комбайна УКД200-500

Від надійності та довговічності ріжучої частини, а саме її зубчастих передач, залежить надійність та довговічність роботи комбайна в цілому. Виходячи з цього, у процесі проектування, а також надалі, з урахуванням досвіду експлуатації, було виконано великий обсяг розрахунків його основних деталей на міцність та витривалість. При виготовленні приводів шахтних комбайнів, виникають проблеми технологічного забезпечення якості обробки зубчастих передач та складання редукторів в умовах дрібносерійного виробництва

Сучасні промислові редуктори є ключовими компонентами механічних систем передачі потужності, але їхня робота неминуче супроводжується

генерацією шуму та вібрації. Ці фактори суттєво впливають на експлуатаційні характеристики обладнання, комфорт роботи персоналу та дотримання екологічних норм. Надмірний шум вказує на тертя, неспіввісність або зношування, які можуть скоротити термін служби редукторів. Тривалий вплив сильного шуму також створює некомфортне та небезпечне робоче середовище.

Виходячи з кінематичних та конструктивних особливостей ріжучої частини комбайну, враховуючи ключову вимогу — максимальну компактність (вписуваність комбайна при видобутку вугілля на тонких пластах з неспокійною гіпсометрією) та ремонтпридатність, виникає об'єктивна необхідність використання прямозубих зубчастих передач редукторів. Прямозубі шестерні відносно прості у виготовленні і можуть витримувати високі навантаження по крутному моменту. Однак прямозубі шестерні мають деякі недоліки. Вони схильні до шумності та можуть виробляти значні вібрації. Основні джерела шуму в зубчастих передачах поділяються на категорії. Кінематичні причини - пов'язані з геометрією зубів та похибками виготовлення (помилки кроку зачеплення, похибки профілю зубів, ексцентриситет зубчастих коліс, відхилення від паралельності осей). Динамічні причини - обумовлені змінними навантаженнями (ударна взаємодія зубів при вході в зачеплення, змінна жорсткість зачеплення, резонансні явища, деформації валів та опор).

Зрозуміло, що шлях нівелювання вказаних недоліків при використанні прямозубих зубчастих передач традиційний — забезпечення плавності ходу за рахунок підвищення точності та якості виготовлення зубчастих передач і складання редукторів. Виходячи з конструктивних методів зниження шуму, які ґрунтуються на оптимізації геометрії зубчастих коліс та параметрів зачеплення (модифікація профілю зубів, оптимізація коефіцієнта перекриття, вибір оптимального числа зубів та модуля, тощо) можна запропонувати для зменшення ударних сил при вході зубів в зачеплення та виході з нього може застосовувати профільну модифікацію головки зуба (фланкування). Тому виникло актуальне науково-практичне завдання виготовлення та дослідження зубчастих передач з профільною модифікацією головки зуба (фланкуванням) з некрatністю зачеплення як елементної бази створення та модернізації редукторів різання очисних комбайнів. Вразі отримання позитивного ефекту від випробування подібних передач можливе удосконалення технологічних процесів виготовлення таких зубчастих передач та складання редукторів

За результатами досліджень запропоновано шляхи нівелювання недоліків при використанні прямозубих зубчастих передач редукторів різання за рахунок профільної модифікації головки зуба (фланкування) з некрatністю зачеплення, що може привести до зменшення вібрацій, шуму, підвищення плавності їхньої роботи. Можливості сучасних технологічних методів формоутворення зубчастих коліс у сукупності зі зв'язними та інноваційними підходами до створення ефективних зубчастих передач в комплексі дадуть синергетичний ефект, який забезпечить подальший розвиток приводів та високі конкурентоспроможні показники вугільних комбайнів нового покоління.

## РОЛЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОЗВИТКУ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

**Бессараб М.П., Юрченко Ю.Ю.**

*(Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна)*

У нинішніх умовах важке машинобудування перебуває на етапі глибокої трансформації, зумовленої розвитком інформаційних технологій та переходом до концепції Індустрії 4.0. Цифровізація виробництва передбачає інтеграцію інформаційних систем у всі етапи життєвого циклу продукції — від проектування до експлуатації та утилізації, що забезпечує підвищення ефективності, гнучкості та конкурентоспроможності підприємств [1, с. 115]. При цьому цифровізація виходить за межі простої автоматизації, формуючи єдине інтелектуальне виробниче середовище, у якому всі процеси є взаємопов'язаними та керуються на основі даних [1, с.115].

Основою сучасного промислового розвитку є впровадження кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей та інтелектуального виробництва, що дозволяє створювати так звані “розумні фабрики”, у яких обладнання та виробничі процеси взаємодіють між собою в єдиному інформаційному середовищі [2, с. 35]. Такі системи забезпечують децентралізоване управління, коли окремі елементи виробництва здатні самостійно приймати рішення на основі отриманих даних, що значно підвищує адаптивність і швидкість реагування на зміни [2, с. 35]. Крім того, використання віртуального моделювання дозволяє тестувати виробничі процеси ще до їх фізичної реалізації, зменшуючи витрати та ризики [2, с. 35].

Важливим аспектом розвитку важкого машинобудування в умовах цифровізації є інтеграція горизонтальних та вертикальних інформаційних систем. Горизонтальна інтеграція передбачає об'єднання всіх учасників виробничого та логістичного ланцюга в єдиний інформаційний простір, тоді як вертикальна інтеграція забезпечує зв'язок між різними рівнями управління підприємством — від виробничого обладнання до систем стратегічного планування [2, с. 36]. Такий підхід дозволяє забезпечити прозорість процесів, оперативний обмін даними та узгодженість дій між підрозділами, що є критично важливим для підвищення ефективності управління виробництвом в умовах динамічного ринку.

Важливу роль у розвитку машинобудування відіграють сучасні цифрові технології, зокрема системи CAD/CAM/CAE, технологія “цифрового двійника”, промисловий Інтернет речей та аналіз великих даних. Їх використання дозволяє створити єдиний цифровий ланцюг розробки продукції, скоротити час проєктування, зменшити кількість помилок та забезпечити повний цикл віртуального тестування ще до створення фізичного прототипу [1, с. 115]. Технологія “цифрового двійника” дає змогу моделювати поведінку об’єктів у реальному часі, прогнозувати можливі відмови обладнання та здійснювати проактивне технічне обслуговування [1, с. 116]. Аналіз великих даних, що надходять із датчиків IoT, дозволяє виявляти приховані закономірності, оптимізувати виробничі процеси та підвищувати якість продукції [1, с. 116][2, с. 35]. Крім того, застосування автоматизованих систем управління та роботизованих технологій сприяє зниженню впливу людського фактора, підвищенню точності виконання операцій та стабільності виробництва [3, с. 21].

Окрему роль у цифровій трансформації відіграють адитивні технології, які дозволяють створювати складні деталі шляхом пошарового додавання матеріалу. Це відкриває можливості для виготовлення виробів зі складною геометрією, зменшення маси конструкцій та оптимізації використання матеріалів [1, с. 116]. Крім того, адитивне виробництво сприяє децентралізації виробничих процесів, дозволяючи виготовляти продукцію “на вимогу”, що знижує витрати на логістику та зберігання [1, с. 116][2, с. 36].

Разом із тим, впровадження інформаційних технологій у важкому машинобудуванні супроводжується рядом проблем. Серед основних слід виділити застарілу інфраструктуру підприємств, недостатній рівень фінансування, дефіцит кваліфікованих кадрів та низьку готовність персоналу до впровадження інновацій [3, с. 20]. Додатковими бар’єрами є необхідність забезпечення кібербезпеки в умовах постійного підключення систем до мережі, а також складність інтеграції різних інформаційних систем у єдиний цифровий простір [2, с. 35]. В умовах України ці проблеми посилюються зовнішніми факторами, зокрема економічною нестабільністю та ризиками для промислової інфраструктури [3, с. 20].

Не менш важливим фактором є розвиток людського капіталу та підготовка фахівців, здатних працювати в умовах Індустрії 4.0. Впровадження цифрових технологій потребує нових компетенцій, зокрема у сфері аналізу даних,

програмування, управління автоматизованими системами та кібербезпеки. Недостатній рівень кваліфікації працівників може стати серйозною перешкодою для цифрової трансформації підприємств [3, с. 21]. У зв'язку з цим виникає необхідність постійного підвищення кваліфікації персоналу, адаптації освітніх програм до сучасних вимог ринку та тісної співпраці між бізнесом, науковими установами та закладами вищої освіти [2, с. 36]. Саме людський фактор у поєднанні з сучасними технологіями визначає успішність впровадження цифровізації та подальший розвиток галузі.

Незважаючи на існуючі труднощі, цифровізація відкриває значні перспективи для розвитку галузі. Використання хмарних технологій забезпечує швидкий доступ до даних і обчислювальних ресурсів, а впровадження інтелектуальних систем управління дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень [2, с. 36]. Комплексне застосування цифрових технологій сприяє підвищенню продуктивності, скороченню витрат, оптимізації використання ресурсів та забезпеченню гнучкості виробництва відповідно до вимог ринку [1, с. 116][2, с. 36]. У результаті це сприяє зміцненню конкурентних позицій підприємств як на національному, так і на міжнародному рівнях.

Отже, інформаційні технології є ключовим фактором розвитку важкого машинобудування, оскільки забезпечують перехід до інноваційної моделі виробництва, формування “розумних” виробничих систем та підвищення ефективності функціонування підприємств. Їх впровадження дозволяє не лише оптимізувати виробничі процеси, але й створює нові можливості для розвитку галузі в умовах глобальної конкуренції та цифрової економіки [1, с. 116][3, с. 21].

#### **Література:**

1. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент : матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 11–13 листопада 2025 року. – Житомир : Житомирська політехніка, 2025. С. 115 – 116. Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/povnyj-tekst.pdf>

2. Скіцько В. І. Індустрія 4.0 як промислове виробництво майбутнього. С. 35 – 37. Режим доступу: [http://www.investplan.com.ua/pdf/5\\_2016/8.pdf](http://www.investplan.com.ua/pdf/5_2016/8.pdf)

3. Сучасні управлінські та соціально-економічні аспекти розвитку держави, регіонів та суб'єктів господарювання в умовах трансформації публічного управління: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (14 листопада 2024 року). — Одеса: Національний університет «Одеська політехніка», 2024. С. 20 – 22. Режим доступу: [https://economics.op.edu.ua/files/science/admin\\_men/2024/tezy24.pdf](https://economics.op.edu.ua/files/science/admin_men/2024/tezy24.pdf)

## НЕОБХІДНІСТЬ В ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ З РЕГУЛЯРНИМИ МІКРОРЕЛЬЄФАМИ

**Бица Р.О.**

*(ТНТУ імені І. Пулюя, м.Тернопіль, Україна)*

Формування на робочих поверхнях деталей машин є ефективним засобом забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей. Їх застосування дає змогу покращувати умови змащування, підвищувати зносостійкість, знижувати коефіцієнт тертя, стабілізувати процеси контактування та збільшувати ресурс трибоспряжень. На відміну від стохастичної шорсткості, регулярні мікрорельєфи мають задані геометричні параметри, які формується відповідно до передбачуваних умов експлуатації. Саме тому оцінювання таких поверхонь лише за традиційними параметрами якості поверхні такими як параметри шорсткості  $R_a$ ,  $R_z$  або  $R_{mc25}$ , чи мікротвердості є недостатнім і не відображають їхньої реальної функціональної здатності. Крім цього ці параметри відносяться до кількісних параметрів, що оцінюють якість поверхні та не враховують особливостей поверхонь з регулярними мікрорельєфами.

Поверхні з регулярними мікрорельєфами характеризуються складною просторовою організацією, що включає форму окремих канавок або заглиблень, їхню глибину, ширину, крок, орієнтацію, густину розміщення, ступінь перекриття та частку площі поверхні, зайняту мікрорельєфом. Для таких поверхонь важливо не лише визначити середнє відхилення профілю, а й кількісно описати закономірність розподілу елементів рельєфу та їхню здатність виконувати певні функції: утримувати мастильний матеріал, акумулювати продукти зношування, зменшувати площу фактичного контакту або регулювати напрямок переміщення мастила в зоні тертя.

На сьогодні єдиним нормативним документом, що регламентує параметри поверхонь з регулярними мікрорельєфами є вже морально застарілий стандарт ГОСТ 24773-81 (1988). Цей документ регламентує геометричні параметри

Документ регламентує як геометричні параметри окремих елементів мікрорельєфу так і параметри їх розміщення. До параметрів елементів мікрорельєфу віднесено висоту елемента  $R$ , глибина канавок  $h$ , амплітуда канавок  $A$ . До параметрів розміщення елементів мікрорельєфу відносять кількість елементів на одиниці площі  $N$ , відносну опорну площу  $T_p$ , кути напрямку розміщення елементів  $\beta$  і  $\gamma$ , осьову  $S_o$  та міжосьову відстань  $S_m$  та відносну площу мікрорельєфу  $F_n$ . Це демонструє, що регулярність мікрорельєфу

має оцінюватися не візуально, а через вимірювані параметри, які дозволяють відтворити структуру в технологічному процесі. Таким чином діючий стандарт визначає значну кількість геометричних параметрів регулярних мікрорельєфів та параметрів їх взаємного розміщення.

Крім цього існує ряд параметрів, які оцінюють не самі поверхні, а властивості поверхонь з регулярними мікрорельєфами. До таких параметрів відносяться вищезгадані параметри якості поверхні – параметри шорсткості, мікротвердість, маслоємність та інші.

Відсутність уніфікованої кількісної параметризації регулярних мікрорельєфів ускладнює порівняння результатів наукових досліджень, вибір оптимальної геометрії рельєфу та встановлення взаємозв'язків між параметрами мікротопографії і експлуатаційними властивостями поверхонь. У багатьох випадках дослідники обмежуються якісним описом виду мікрорельєфу або наведенням окремих геометричних розмірів його елементів. Такий підхід не забезпечує достатньої відтворюваності результатів і не дає змоги створити формалізовані критерії оцінювання ефективності тієї чи іншої структури поверхні.

Особливо важливою кількісна параметризація є для регулярних мікрорельєфів, сформованих у вигляді систем канавок різної конфігурації – прямолінійних, синусоїдальних, циклоїдальних, спіральних або сітчастих. У таких випадках експлуатаційні властивості визначаються не лише глибиною та шириною канавок, а й геометрією їхньої траєкторії, радіусами кривизни, довжиною контуру, відстанню між сусідніми елементами, характером їхнього перетину та площею розкриття рельєфу на робочій поверхні. Вказані характеристики безпосередньо впливають на гідродинамічні процеси в зоні контакту, локальний розподіл тиску та формування мастильної плівки.

Кількісна параметризація створить передумови для переходу від емпіричного вибору геометрії мікрорельєфу до її цілеспрямованого проектування. Вона дасть змогу будувати математичні моделі взаємозв'язку між параметрами сформованої поверхні та показниками її експлуатаційної ефективності, зокрема коефіцієнтом тертя, інтенсивністю зношування, температурою в зоні контакту, навантажувальною здатністю та довговічністю. Це особливо актуально для оптимізації технологічних режимів і створенні цифрових моделей поверхонь з регулярними мікрорельєфами.

Зважаючи на те, що створюються нові типи мікрорельєфів [2] кількісна параметризація є основою для спрямованого проектування поверхонь з

регулярними мікрорельєфами, які забезпечать необхідні експлуатаційні властивості поверхні. Параметризація дасть можливість обрати відповідні технологічні операції.

Практично параметризація параметрів поверхонь з регулярними мікрорельєфами дозволить забезпечити:

- порівнюваність різних типів регулярних мікрорельєфів між собою та коректне зіставлення результатів експериментальних досліджень;
- встановлення кількісних залежностей між геометрією мікрорельєфу та експлуатаційними властивостями поверхні, зокрема тертям, зношуванням, здатністю утримувати мастильний матеріал і ресурсом контактних пар;
- цілеспрямований вибір або оптимізацію параметрів мікрорельєфу для конкретних умов роботи деталей;
- відтворюваність результатів формування мікрорельєфу під час технологічної обробки;
- контроль відповідності реально сформованої поверхні її розрахунковій або проєктній геометрії;
- створення математичних моделей, алгоритмів оптимізації та цифрових методик проєктування функціональних поверхонь.

Отже, необхідність кількісної параметризації поверхонь з регулярними мікрорельєфами обумовлена потребою в об'єктивному, відтворюваному та функціонально орієнтованому оцінюванні їхньої мікротопографії. Такий підхід дозволяє не лише повніше характеризувати сформовану поверхню, а й встановлювати закономірності впливу параметрів мікрорельєфу на експлуатаційні властивості деталей. Подальший розвиток системи кількісних показників для опису регулярних мікрорельєфів є важливим напрямом удосконалення методології їх проєктування, виготовлення та практичного застосування у машинобудуванні.

#### **Література:**

1. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Bytsa, R.; Zinchenko, I. Planar Non Uniformity of Regular and Partially Regular Microreliefs and Method for Its Evaluation. Eng 2025, 6, 314. <https://doi.org/10.3390/eng6110314>
2. V. Dzyura P. Maruschak, R. Bytsa. Classification of Regular Microreliefs of the Volumetric Class. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering ISSN: 2229-2152 (Print); 2697-424x (Online) (2026) Vol. 14, No. 1, Paper No. JRAME 26-14-015 [DOI: 10.14456/jrame.2026.15]

## ТОВАРНА ПОЛІТИКА ТОРГОВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

**Бурцева О.Є., Бондаренко А.О.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасні умови функціонування економіки України характеризуються високим рівнем нестабільності, що пов'язано з воєнним станом, інфляційними процесами, змінами споживчого попиту, порушенням логістичних ланцюгів та посиленням конкурентної боротьби між підприємствами. У таких умовах особливого значення набуває ефективна товарна політика торговельного підприємства, яка є важливою складовою загальної маркетингової стратегії та визначає рівень конкурентоспроможності підприємства на ринку.

Товарна політика підприємства являє собою систему управлінських рішень щодо формування асортименту товарів, забезпечення їх якості, оновлення продукції, визначення товарної номенклатури та підтримання оптимального співвідношення між попитом і пропозицією. Основною метою товарної політики є задоволення потреб споживачів та отримання прибутку підприємством.

В умовах нестабільної економіки торговельні підприємства стикаються з рядом проблем, серед яких: зниження купівельної спроможності населення; нестабільність постачання товарів; коливання валютного курсу; зростання витрат на логістику; зміна структури споживчого попиту; посилення конкуренції на ринку.

За таких умов підприємства змушені постійно адаптувати товарну політику до змін зовнішнього середовища. Одним із головних завдань стає формування оптимального асортименту товарів. Підприємствам необхідно орієнтуватися на найбільш затребувані категорії продукції, враховувати рівень платоспроможності населення та швидко реагувати на зміну потреб споживачів.

Важливу роль у формуванні товарної політики відіграє аналіз споживчого попиту. Сучасні підприємства повинні регулярно проводити маркетингові дослідження, вивчати поведінку покупців, аналізувати обсяги продажів та визначати найбільш перспективні товарні групи. Це дозволяє своєчасно коригувати асортимент та уникати надлишкових товарних запасів.

Особливого значення в умовах економічної нестабільності набуває управління асортиментом товарів. Торговельним підприємствам доцільно: оптимізувати товарні запаси; скорочувати частку низькорентабельної продукції; розширювати асортимент товарів першої необхідності; впроваджувати товари власних торгових марок; диверсифікувати джерела постачання продукції.

Одним із ефективних напрямів удосконалення товарної політики є розвиток власних торгових марок. Такі товари, як правило, мають нижчу собівартість та доступнішу ціну для споживачів, що особливо актуально в умовах зниження доходів населення. Крім того, власні торгові марки дозволяють підприємствам підвищити рівень лояльності покупців та зміцнити ринкові позиції.

Важливим елементом товарної політики є забезпечення якості продукції. В умовах високої конкуренції споживачі дедалі більше звертають увагу не лише на ціну товару, а й на його якість, безпечність та надійність. Тому підприємствам необхідно здійснювати контроль якості товарів, співпрацювати з надійними постачальниками та впроваджувати сучасні стандарти обслуговування.

Суттєвий вплив на товарну політику має розвиток цифрових технологій та електронної комерції. Сучасні торговельні підприємства активно використовують онлайн-платформи, CRM-системи, електронні каталоги та інструменти цифрового маркетингу. Це дозволяє оперативно аналізувати потреби споживачів, персоналізувати пропозиції та підвищувати ефективність управління товарним асортиментом.

Крім того, у сучасних умовах важливим фактором успішної товарної політики є гнучкість підприємства та здатність швидко адаптуватися до змін ринку. Підприємства повинні своєчасно оновлювати асортимент, впроваджувати інноваційні товари та використовувати сучасні методи управління товарними запасами.

Отже, в умовах нестабільної економіки товарна політика торговельного підприємства набуває стратегічного значення та стає одним із головних інструментів забезпечення ефективної діяльності підприємства. Сучасні економічні виклики, пов'язані з інфляційними процесами, коливанням валютного курсу, зниженням купівельної спроможності населення, порушенням логістичних ланцюгів та посиленням конкуренції, вимагають від підприємств постійної адаптації до змін ринкового середовища.

Ефективна товарна політика дозволяє підприємству не лише підтримувати стабільний рівень продажів, а й формувати конкурентні переваги, підвищувати рівень лояльності споживачів та забезпечувати довгостроковий розвиток. Важливого значення набуває правильне формування товарного асортименту, орієнтація на актуальні потреби покупців, оптимізація товарних запасів та своєчасне оновлення продукції.

У сучасних умовах торговельним підприємствам необхідно активно використовувати маркетингові дослідження для аналізу змін у споживчій поведінці та швидкого реагування на коливання попиту. Гнучкість у формуванні асортименту, диверсифікація постачальників, розвиток власних торгових марок та впровадження сучасних цифрових технологій стають важливими складовими ефективною товарної політики.

Таким чином, успішна товарна політика в умовах нестабільної економіки повинна базуватися на принципах гнучкості, адаптивності, інноваційності та орієнтації на потреби споживачів. Лише комплексний підхід до управління товарним асортиментом, якістю продукції та взаємодією з покупцями забезпечить торговельному підприємству стабільне функціонування, конкурентоспроможність та можливість подальшого розвитку в сучасних економічних умовах.

# СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НА ГНУЧКИХ КОМПЛЕКСАХ

**Васильченко Я.В, Мироненко О. Є.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Зростаюча складність формоутворення великомодульних зубчастих коліс, підвищення їхньої надійності та довговічності, а також вимоги зменшення собівартості їх виготовлення потребують системного підходу.

Систему формоутворення зубчастих коліс (ФЗК) можна описати в вигляді:

$$\PhiЗК = \{U, Ц, \Phi, P, R(U, Ц), R(U, P), R(U, \Phi), R(Ц, P), R(\Phi, P)\}$$

де  $U$  - умови та особливості формоутворення зубчастих коліс;

$Ц$  - цілі використання, критерії;  $\Phi$  – фізичні процеси у системі;

$P$  - режими роботи системи;  $R$  - взаємозв'язки між всіма елементами системи

Система ФЗК, є елементом загальної виробничої системи. Сучасний інструмент, що входить до складу технологічної системи, також є досить складною системою.

Ієрархічний граф показано на рис 1, де для уточнення розкривається композиція лише одного елемента кожного рівня . Повний огляд системи, тобто початок аналізу на вищих рівнях або охоплення більшої кількості елементів на заданому рівні, забезпечує більшу ефективність. Наприклад, багато похибок і недоліків у проектуванні збірних фрез пов'язано з неповним аналізом умов формоутворення великомодульних зубчастих коліс. Інструмент не можна розглядати окремо від верстата на якому відбувається обробка зубчастих коліс. Тому, одночасна оптимізація параметрів інструменту з оптимізацією режимів зубофрезерування дає більш точні та ефективні результати при формоутворенні великомодульних зубчастих коліс.



Рис. 1. Технологічна система у вигляді ієрархічного графа  
(I– інструмент; З.К – зубчасте колесо; В – верстат.)

Проведені дослідження показують, що нераціонально створювати інструмент для конкретних, окремих технологічних операцій зубофрезерування

і верстатів (за винятком спеціальних інструментів, і навіть тоді не завжди). Необхідно розробляти систему інструментів для певного набору операцій і верстатів. У цьому випадку інструментальна система розуміється як набір конструктивних варіантів і розмірів фрез для формоутворення великомодульних зубчастих коліс. На основі особливостей формоутворення зубчастих коліс, можна визначити основні принципи інструментального забезпечення:

- обмеження номенклатура фрез за рахунок забезпечення необхідної кількості різноманітних компоновок та положень багатогранних пластин;
- достатньо високу точність позиціонування багатогранних пластин в корпусі фрези відносно формоутворюючої кривої;
- обов'язкове використання багатогранних пластин зі зносостійкими покриттями і параметрами передньої поверхні, що забезпечує задовільне стружкоутворення та стружковідведення.

Виходячи із проведених досліджень формоутворення великомодульних зубчастих коліс різними конструкціями фрез з механічним кріпленням багатогранних пластин, як для чорнового та і для чистового зубофрезерування,, беручи за основу принципи системного підходу з урахуванням особливостей обробки, реалізовано систему інструментального забезпечення фрезерування на прикладі високоавтоматизованого гнучкого комплексу «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 (рис. 2)

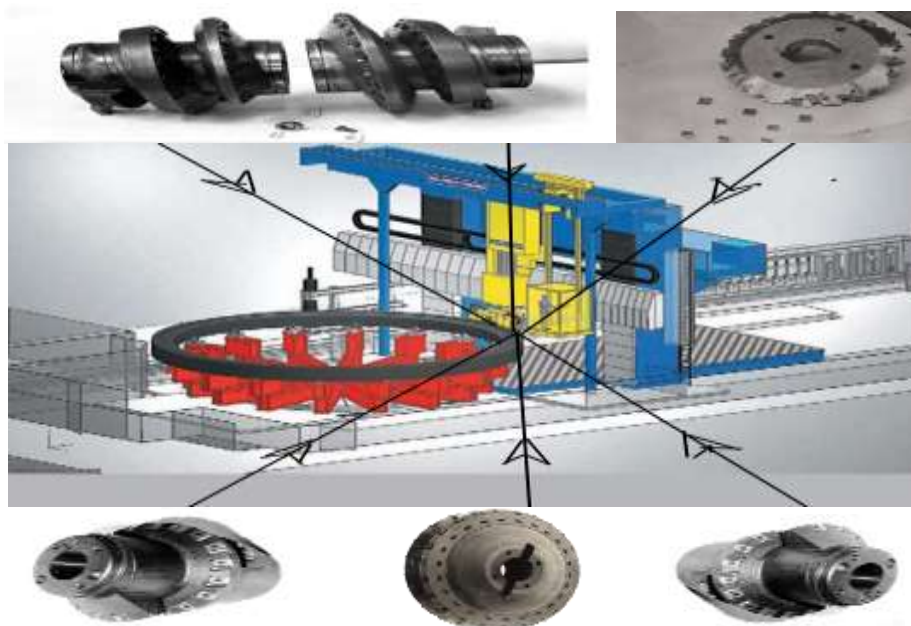


Рис. 2. Система інструментального забезпечення зубофрезерування на прикладі високоавтоматизованого обробного центру «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500

Головним критерієм вибору методу формоутворення та конструктивного варіанту фрези на високоавтоматизованих гнучких комплексах є задані параметри зубчастих коліс та економічна ефективність, яка визначається часом зубофрезерування та собівартістю обробки.

## **КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТОЧІННЯ СТАЛЕЙ У ВАЖКИХ УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Васильченко Я.В., Пономаренко О.В., Захаров Є.О., Короття П. Р.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасне важке машинобудування характеризується широким використанням токарної обробки великогабаритних деталей, таких як прокатні валки, колісні пари, ротори, вали та інші відповідальні елементи, експлуатація яких відбувається в умовах значних силових і температурних навантажень. Особливістю чорнового та відновлювального точіння таких деталей є робота за великих глибин різання, підвищених подач, змінних припусків і значних коливань механічних характеристик оброблюваного матеріалу. За цих умов процес різання супроводжується інтенсивним термомеханічним навантаженням ріжучого леза, високими контактними температурами, зростанням сил різання, розвитком пластичних деформацій інструмента та прискореним зношуванням ріжучого клина, що суттєво знижує ефективність обробки, погіршує точність формоутворення та скорочує ресурс інструмента. Це обумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованих методик дослідження процесів точіння в тяжких умовах різання, які дозволяють комплексно враховувати взаємозв'язок термомеханічних явищ, процесів зношування інструмента та параметрів формоутворення обробленої поверхні.

Метою роботи є розроблення методики дослідження процесів точіння сталей у важких умовах термомеханічного навантаження ріжучого леза для підвищення ефективності технологічних процесів у важкому машинобудуванні. Запропонована методика базується на комплексному поєднанні теоретичного моделювання, розрахункового аналізу, експериментальної перевірки та оптимізації технологічних параметрів. На відміну від традиційних емпіричних підходів до вибору режимів різання, методика дозволяє враховувати нелінійний характер взаємодії температурних, силових, деформаційних і зносних процесів, що виникають у зоні різання при обробці великогабаритних сталевих деталей. Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного методичного підходу до дослідження процесу точіння, який базується на інтеграції

термомеханічних моделей, моделей сил різання, прогнозування зношування ріжучого леза та експериментальної верифікації розрахункових результатів в єдиній системі аналізу процесу різання. Структура запропонованої методики дослідження наведена на рисунку 1. Вона включає блок вихідних даних, до складу якого входять параметри режимів різання, властивості оброблюваного матеріалу, характеристики інструментального матеріалу, геометричні параметри ріжучого леза та обмеження за міцністю і тепловим станом системи. На основі цих даних реалізується блок теоретичного моделювання процесу точіння, що передбачає визначення температур на поверхнях ріжучого інструмента, розрахунок напружень і деформацій, визначення сил різання та усадки стружки, оцінку інтенсивності зношування ріжучого леза і прогнозування точності формоутворення. Сукупність цих моделей формує комплексну математичну модель процесу точіння в тяжких умовах термомеханічного навантаження ріжучого леза, яка дозволяє досліджувати взаємозв'язок основних фізичних процесів у зоні різання.

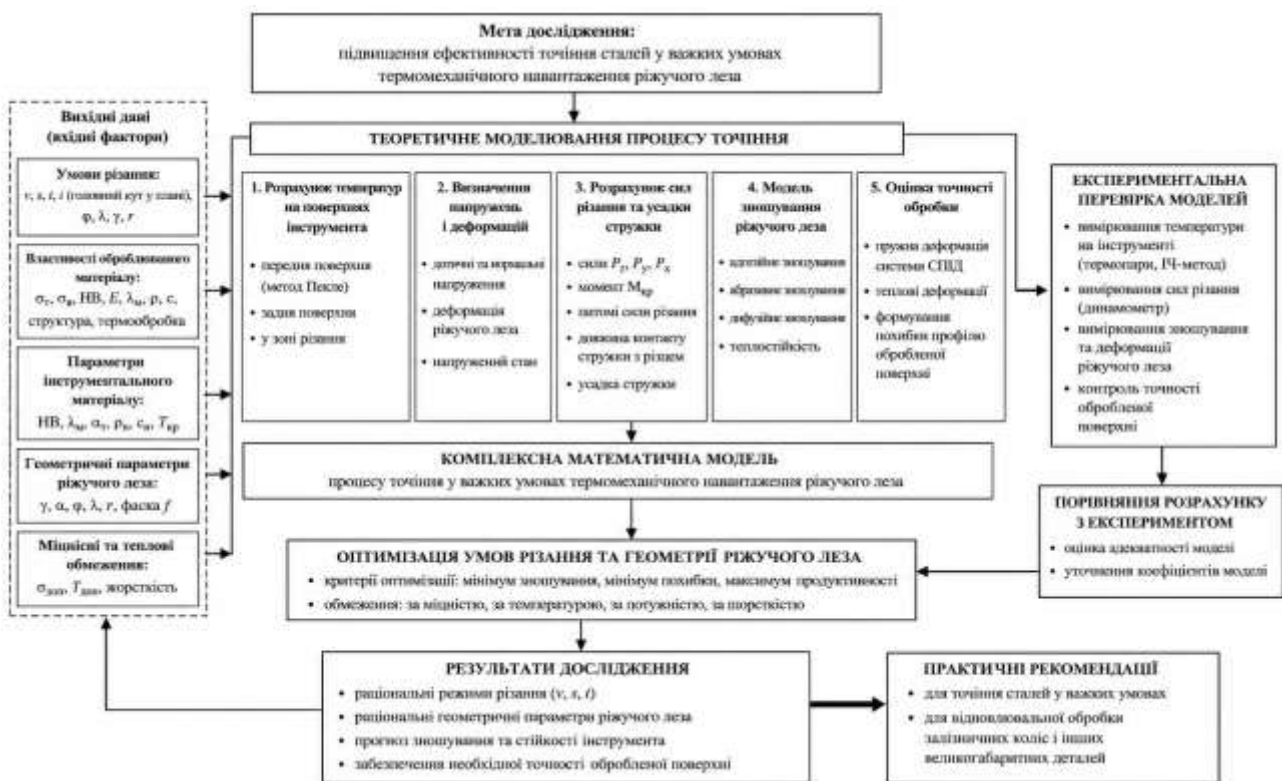


Рис. 1. Методика дослідження процесів точіння сталей у важких умовах термомеханічного навантаження ріжучого леза

Важливим етапом методики є експериментальна перевірка розрахункових моделей, яка передбачає вимірювання температури на інструменті, сил різання, характеристик зношування ріжучого леза, а також контроль точності обробленої поверхні. Порівняння розрахункових і експериментальних даних дозволяє оцінити адекватність математичних моделей, уточнити коефіцієнти розрахункових залежностей і визначити межі застосування моделей для різних умов точіння. Новим є запропонований принцип методичного поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, який забезпечує не лише розрахунок окремих параметрів процесу різання, а й комплексну оцінку їхнього впливу на стійкість інструмента, точність обробки та технологічну ефективність процесу. Це дозволяє перейти від ізольованого аналізу окремих факторів до системного дослідження процесу точіння як складної термомеханічної системи.

На основі побудованої математичної моделі та результатів експериментальної перевірки реалізується блок оптимізації умов різання та геометрії ріжучого леза, у якому критеріями оптимізації виступають мінімізація інтенсивності зношування інструмента, зменшення похибок обробки та підвищення продуктивності процесу. Обмеженнями при цьому є допустимі температури, міцність ріжучого клина, потужність різання та вимоги до шорсткості поверхні. Такий підхід дозволяє визначати раціональні режими різання, прогнозувати стійкість інструмента та формувати практичні рекомендації щодо обробки сталевих деталей у важких умовах різання.

Практична значущість запропонованої методики полягає у створенні науково-методичної основи для дослідження і оптимізації процесів точіння в умовах важкого машинобудування, де традиційні емпіричні підходи не забезпечують достатньої точності прогнозування параметрів процесу. Запропонована методика дозволяє комплексно досліджувати процеси стружкоутворення, термомеханічного навантаження, зношування ріжучого леза та формоутворення поверхні в єдиному аналітичному середовищі, що створює теоретичну основу для розроблення раціональних технологічних рішень у важкому машинобудуванні.

## РОЗРАХУНОК НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ МАЛИХ ШВИДКОСТЕЙ МЕТАЛООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Голофєєва М.О., Паленний Ю.Г., Салютін М.В.**

*(Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна)*

Під час контролю технічного стану напрямних, столів, кареток та інших рухомих вузлів металообробного обладнання виникає потреба у вимірюванні малих швидкостей переміщення. Вихідний сигнал індуктивних датчиків безпосереднього вимірювання швидкості для таких режимів має дуже низькі рівні корисного сигналу, через що навіть незначні електромагнітні завади, нестабільність параметрів датчика істотно впливають на результат [1]. Тому перед проектуванням первинного перетворювача необхідно сформулювати бюджет невизначеності вимірювань, який дає можливість оцінити метрологічну придатність запропонованого рішення ще на етапі його розробки.

Традиційні датчики швидкості здебільшого реалізують опосередковане вимірювання через відстань і час, а сумарна невизначеність у такому разі формується внаслідок поєднання невизначеностей цих двох каналів вимірювань. Перспективнішим є підхід, за якого фізична величина «швидкість» безпосередньо перетворюється на електричну напругу індуктивним датчиком на основі явища електромагнітної індукції [2]. Для проєктованих засобів вимірювальної техніки доцільно застосовувати оцінювання невизначеності за типом В, оскільки статистичний масив даних на початковому етапі проєктування, як правило, відсутній.

Метою роботи є обґрунтування моделі розрахунку комбінованої невизначеності під час вимірювання малих швидкостей переміщення елементів металообробного обладнання індуктивним датчиком та визначення чинників, які найбільше впливають на кінцевий результат вимірювання.

**Виклад основного матеріалу.** Принцип дії запропонованого перетворювача полягає у виникненні електрорушійної сили в котушці, що переміщується в магнітному полі. За умови взаємної перпендикулярності векторів швидкості, магнітної індукції вихідний сигнал  $\varepsilon$  є лінійно пропорційним швидкості. Для спрощеної моделі рівняння перетворення має вигляд:

$$\varepsilon = NBlv$$

де  $N$  – кількість витків котушки;  $B$  – магнітна індукція в зазорі;  $l$  – активна довжина провідника;  $v$  – швидкість переміщення.

Для розрахункової моделі прототипу датчика прийнято  $N = 1000$  витків,  $B = 0,086$  Тл,  $l = 0,01$  м. За швидкості 5 мм/хв, що відповідає  $8,33 \cdot 10^{-5}$  м/с, очікуване значення ЕРС становить приблизно  $7,17 \cdot 10^{-5}$  В, або 71,7 мкВ. Отже, корисний сигнал перебуває у мікрвольтовому діапазоні, що висуває підвищені вимоги до захисту від завад, вибору вхідного тракту та процедури оцінювання невизначеності.

Лінійність характеристики датчика в межах 1–10 мм/хв є принципово важливою, оскільки вона спрощує процедуру калібрування датчика, дає можливість використовувати аналітичну модель перетворення та коректно переносити невизначеність вхідних величин на результат вимірювання швидкості.

За відсутності суттєвої кореляції між вхідними величинами отримаємо:

$$u_c(v) = v \sqrt{\left(\frac{u(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2}$$

Отже, відносна комбінована невизначеність швидкості визначається сумою квадратів відносних стандартних невизначеностей напруги, магнітної індукції, активної довжини провідника та кількості витків. На практиці найбільш нестабільними складовими вимірювання надмалих напруг є неоднорідність магнітного поля в робочому зазорі, допуски геометричних параметрів котушки і температурний вплив на опір та добротність обмотки.

З огляду на статичність конструкції датчика більшу увагу слід звернути на зовнішні та внутрішні завади, які необхідно враховувати під час побудови бюджету невизначеності. До них належать мережеві наведення 50 Гц і їх гармоніки, завади від імпульсних блоків живлення, світлодіодних драйверів, радіомовлення в діапазонах довгих і середніх хвиль, а також власні ефекти вимірювального тракту: наведенні завади проводів щупів, петлі заземлення, аліасинг та шум засобу вимірювань. Для малих швидкостей амплітуда цих завад

може бути співрозмірною або навіть більшою за корисний сигнал, тому їх внесок до невизначеності є визначальним.

Для зменшення впливу завад доцільно застосовувати скручування та екранування проводів, використовувати RC-фільтри, демпфування власного резонансу котушки, застосовувати живлення вимірювальної апаратури від автономних джерел.

Побудова бюджету невизначеності має виконуватися за такою послідовністю: складання рівняння вимірювання; визначення оцінених значень вхідних величин; розрахунок стандартних невизначеностей; перевірка можливих кореляцій; визначення комбінованої та розширеної невизначеності; аналіз чутливості результату до зміни кожної складової [3]. Саме така логіка є придатною для практичної реалізації у системах контролю малих швидкостей металообробного обладнання.

Запропонований підхід до оцінювання невизначеності вимірювань малих швидкостей індуктивним датчиком дає можливість формалізувати вплив конструктивних і зовнішніх факторів на результат вимірювання. Установлено, що за швидкості 5 мм/хв корисний сигнал прототипу датчика має рівень близько 71,7 мкВ, тому головним резервом підвищення точності є зменшення невизначеності каналу вимірювання напруги та придушення електромагнітних завад. Розроблена модель може бути використана під час проектування засобів вимірювальної техніки для діагностики та контролю параметрів металообробного обладнання.

#### **Література:**

1. Problems of measuring low feed rates of metal cutting equipment Golofeyeva Maryna O Palennyi Yuriy G Salyutin M. Праці Одеського політехнічного університету, 90-95, 2023
2. Голофєєва М., Аналіз методів вимірювання нерівномірності руху подач металорізальних верстатів / М Голофєєва, Ю Паленний, М Салютін, В Тіхенко, О Лаврук. // Measuring and computing devices in technological processes / Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» -- 2025, Issue 2, с. 250-256. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-34>.
3. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1st ed. Sèvres : JCGM, 2008. 120 p.

## **ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАЛИХ МАГНІТІВ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ**

**Григор'єв Ю.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С.**

*(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна)*

Створення інструменту для фінішної обробки, який може використовуватися на універсальному металорізальному обладнанні, на верстатах з ЧПК і не потребує спеціального налагодження є актуальною проблемою. Її вирішення полягає у використанні спеціальних головок торцевого і кінцевого типів, які використовують сталі високоенергетичні магніти і дозволяють формувати рухомо-скоординований магнітно-абразивний інструмент (МАІ). Властивості такого інструменту будуть залежати від розмірів і конструкції головок, типу, розміру і форми частинок магнітно-абразивного порошку який використовують для формування МАІ, технологічних параметрів процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО), таких як швидкість обертання головок навколо власної осі, швидкість переміщення головок відносно поверхонь, що оброблюють (швидкість подачі), величини робочих зазорів, змочувально-охолоджуючих технологічних середовищ та інші.

Виконані дослідження процесу МАО феромагнітних деталей показали, що найкращі результати по параметру шорсткості після МАО можуть досягати величини  $Ra < 0,03$  мкм при вихідній шорсткості  $Ra = 0,9-1,2$  мкм, отриманій після фрезерування [1]. Зазначені результати було отримано при використанні торцевих головок з нанесеними на їх робочу торцеву поверхню 9-12 променеподібних, трапецієвидних в перерізі виступів висотою 2 мм, з шириною основи 3 мм і площадкою на вершині шириною 1 мм [2]. Результати отримані при використанні різних магнітно-абразивних порошоків отриманих методом розпилення з розплавів і порівнянні їхньої абразивної і поліруючої здатності показали, що мінімальну шорсткість після МАО можна отримати МАІ, який формується з відносно крупних порошоків з розміром частинок більше 400 мкм,

що пов'язано з величиною різальних кромок окремих частинок і особливими умовами взаємодії з оброблюваними поверхнями в процесі МАО [1,3]. Треба відзначити, що суттєво знижується вплив фактору технологічної спадковості, пов'язаний з регулярною хвилястістю, яка формується на етапі фрезерування. Показано, що важливим фактором в технологічному процесі МАО є величина робочого зазору, який визначається виходячи з розміру частинок магнітно-абразивного порошку, що використовується [4]. Встановлено, що в процесі МАО відбувається мікропластичне деформування поверхневого шару виробів, яке призводить до наклепування та формуванню в ньому залишкових стискаючих напружень, величина яких залежить як від розмірів частинок магнітно-абразивних порошоків, так і від їх форми. Найбільші напруження на рівні 75-165 МПа отримано при використанні переважно порошоків округлої форми з розміром частинок в діапазоні 0,8 - 1,62 мм.

#### **Література:**

1. Maiboroda V.S. AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method/, Belajev O.O., Dzhulii D.Yu. , Slobodianiuk I.V.// Journal of engineering sciences, vol.7(1), pp.A1–A7, Doi: 10.21272/jes. 2020.7(1). 2.Maiboroda V. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads.
- 2.The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining/ Maiboroda V. Dzhulii D., Zelinko A., Burikov A. //Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – Vol. 90, № 3 (2020) - p.73-81.
3. Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь феромагнітних деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів /В.С.Майборода, О.О.Буріков // Технічні науки та технології – 2026. - №2(44). – С.157-170. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44))
4. Майборода В.С. Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах. 1. Влияние типа магнитно-абразивного порошка на эффективность магнитно-абразивной обработки./ В.С.Майборода, Д.Ю. Джулий, А.И.Зелинко // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. - Том 89, № 2 (2020)- - с.121-130

# ВПЛИВ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ НА ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ 40X В ЗАГАРТОВАНОМУ СТАНІ

Дубініна О.Т., Медведєв В.В.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна)

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є безконтактним методом впливу на метал, що базується на дії короткочасного імпульсного магнітного поля високої інтенсивності. Внаслідок цього впливу в поверхневому шарі матеріалу відбуваються зміни структурно-дефектного стану без суттєвого теплового навантаження. Основними механізмами є взаємодія магнітного поля з доменною структурою та дислокаціями, що призводить до їх перерозподілу і, як наслідок, зміни механічних властивостей металу.

За результатами численних досліджень встановлено, що магнітно-імпульсна обробка сприяє підвищенню твердості різних марок сталей [1-2]. Це пояснюється активацією мікропластичних процесів, зростанням щільності дислокацій та перебудовою мікроструктури поверхневого шару. Найбільш виражений ефект спостерігається для сталей у вихідному (незміцненому) стані.

У даній роботі досліджувався вплив магнітно-імпульсної обробки на сталі в двох станах: без попередньої термічної обробки та після гартування. Обробка здійснювалася імпульсами магнітного поля з енергією 1000 Дж.

Результати експериментальних досліджень показали, що для сталей без попереднього зміцнення після МІО спостерігається підвищення твердості. Це свідчить про ефективність впливу імпульсного магнітного поля на структурно-дефектний стан матеріалу та формування зміцненого поверхневого шару.

Для загартованих сталей суттєвого підвищення твердості після магнітно-імпульсної обробки не виявлено. Гартування проводилося за типовим режимом: нагрів до температури аустенітизації (800–850 °С) з подальшим охолодженням у водному середовищі, що забезпечувало формування мартенситної структури з високою початковою твердістю. Для оцінки впливу магнітно-імпульсної обробки було досліджено чотири зразки сталі, оброблені різною кількістю імпульсів. Отримані результати вимірювання твердості наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювання твердості загартованих зразків

№ зразка	Кількість імпульсів, шт	Напруга, В	Твердість до МІО, HRC	Твердість після МІО, HRC
1	11	320	42,1; 43; 41,8	41; 40,2; 41
2	30	320	41; 44,1; 43	40,5; 41,9; 42
3	11	480	43,1; 42; 45	46,5; 43; 41
4	30	480	44; 42,9; 45	44,5; 44; 46

Обмежений ефект МІО для загартованих сталей пояснюється тим, що їх мікроструктура вже знаходиться у високоенергетичному зміцненому стані з високою щільністю дислокацій та внутрішніх напружень. У таких умовах додатковий вплив імпульсного магнітного поля не викликає суттєвої структурної перебудови, а отже — не призводить до помітного зростання твердості.

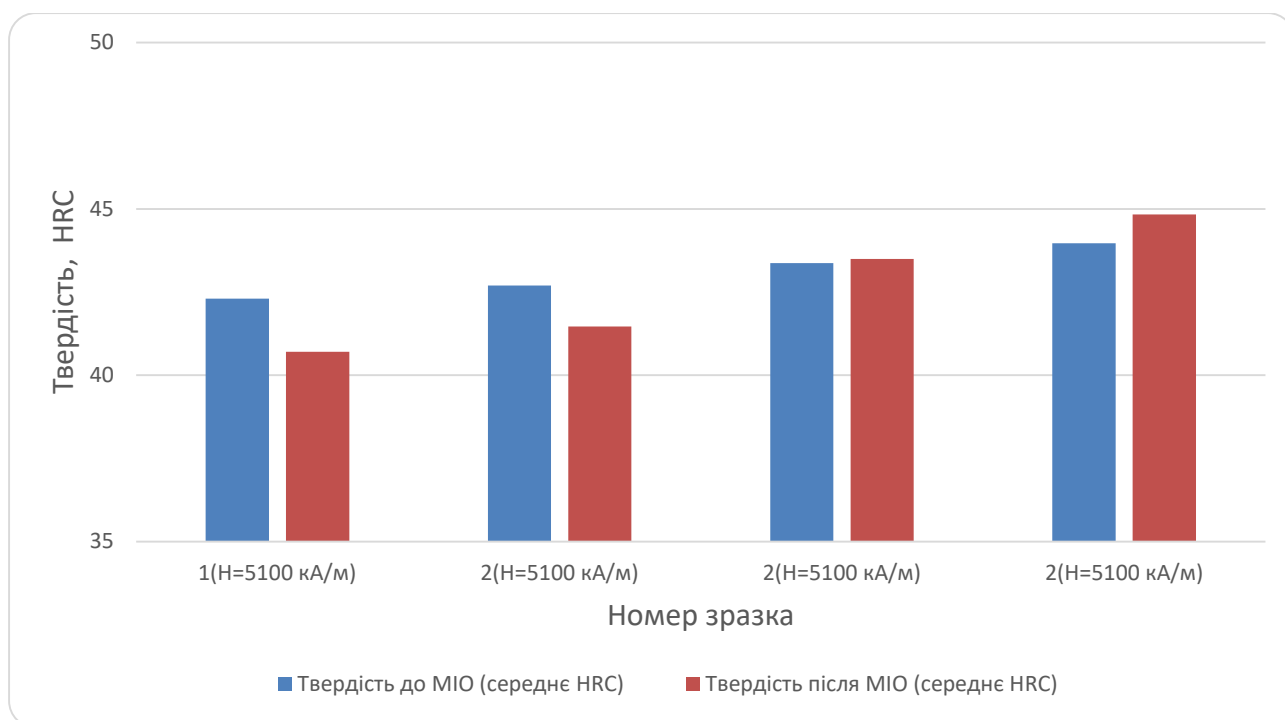


Рис. 1. Результати вимірювання твердості загартованих зразків зі сталі 40X при напруженості  $H = 5100-6300$  кА/м

Для зразка №1 після магнітно-імпульсної обробки спостерігається незначне зниження твердості приблизно на 2 HRC порівняно з початковим станом. Таке зменшення можна пояснити частковою релаксацією внутрішніх напружень, що виникли після гартування, під дією імпульсного магнітного поля. Аналогічна тенденція спостерігається і для зразка №2, де також відзначається незначне зниження твердості, що свідчить про переважання процесів релаксації над можливим зміцненням матеріалу. Для зразків №3 та №4 зміни твердості після МІО знаходяться в межах похибки вимірювання, тому суттєвого впливу обробки на механічні властивості загартованої сталі в цих режимах не зафіксовано. Це підтверджує, що для загартованих сталей ефективність магнітно-імпульсної обробки є обмеженою через вже сформований високоміцний структурний стан матеріалу.

Таким чином, ефективність магнітно-імпульсної обробки визначається як початковим структурним станом матеріалу, так і енергією імпульсного впливу. Найбільший ефект підвищення твердості досягається для сталей без попереднього зміцнення. Для загартованих сталей при енергії імпульсу близько 1000 Дж зростання твердості не спостерігається, оскільки їх твердість вже наближається до граничних значень. Разом із тим можна припустити, що використання імпульсів більшої енергії (10–20 кДж) може забезпечити більш виражений ефект для загартованих сталей, однак це потребує додаткових експериментальних досліджень.

**Література:** 1. Hou M. Effects of Pulsed Magnetic Fields of Different Intensities on Dislocation Density, Residual Stress, and Hardness of Cr4Mo4V Steel / M. Hou, Y. Zhang, J. Lu, H. Zhou, Y. Zhang // *Crystals*. – 2020. – Vol. 10, No. 2. – Article 115. 2. Kostyk K. Impact of Magnetic-Pulse and Chemical-Thermal Treatment on Alloyed Steels' Surface Layer / K. Kostyk, V. Kostyk, O. Aksonova, A. H. Li, O. Tkach // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – 469.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОГО ФРЕЗУВАННЯ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ З ВЕЛИКИМ ВІЛЬОТОМ

Дядя С.І., Козлова О.Б., Тришин П.Р., Крамаренко О.О.  
(НУ «Запорізька політехніка, м.Запоріжжя, Україна)

Використання багатокоординатних фрезерних верстатів з ЧПК в технологічних процесах виготовлення складнопрофільних деталей, таких як лопатки моноколів, прес-форми штампів, корпусні деталі, дозволяє досягти високої точності оброблення та продуктивності. Основним інструментом для оброблення криволінійних поверхонь є кінцеві фрези різної конструкції. Через наявність глибоких порожнин або важкодоступних зон в конструкціях деталей інструмент часто має великий виліт ( $L/D > 3-5$ ). Це робить фрези нежорсткими та чутливими до навантажень та вібрацій під час різання. Як наслідок, погіршується шорсткість, точність розміру та форми оброблених поверхонь. Дослідження, які проводилися для забезпечення стабільності різання за таких умов [1], дозволили визначити компенсаційні заходи. Вони передбачають використання фрез з посиленням конусним хвостовиком, що значно жорсткіші за циліндричні; перехід на плунжерне фрезування з подачею вздовж осі Z, коли жорсткість інструменту найбільша; розподіл на чорнове та чистове оброблення з мінімальним припуском для фінішного проходу; застосування трохоїдальної траєкторії руху інструменту, що дозволяє тримати постійний кут контакту та стабілізувати силу відтискання. При цьому головною перешкодою для продуктивності є недостатня обізнаність щодо видів коливань, які діють при різанні. Традиційно вважається, що при фрезуванні тонких зрізів кінцевими фрезами найбільший вплив на якість обробленої поверхні мають автоколивання. Але проведені дослідження [2] спростовують їх домінування через короткочасність контакту інструменту з деталлю. Встановлено, що головним чинником зниження якості є супроводжуючі вільні коливання (СВК), які накладаються на вимушені. Саме ці коливання помилково вважають за автоколивання, що призводить до неефективного вибору методів пригнічення вібрацій. За умови, коли час різання менший за період СВК, вони не виникають і під час фрезування діють тільки вимушені коливання. Це дає підстави для визначення умов різання ще на етапі технологічної підготовки. Щоб мати уяву про період СВК треба визначити період вільних коливань фрези. За рахунок контактної жорсткості під час зустрічного фрезування період СВК буде більший за період вільних коливань на 15%, а при попутному – на 30%. Якщо за підрахунками час різання буде більший за період СВК, то для стабільного оброблення довгими фрезами сила різання повинна бути незначною, в першу чергу за рахунок зменшення осьової глибини різання.

**Література:** 1. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. Cambridge University Press, 2012. 366 p. 2. Dyadya S., Vnukov Y., Kozlova O., Trishyn P. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. P.136–144. doi: 10.1007/978-3-031-42778-7\_13

# ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

**Задорожня І. М., Кечко А. В., Приймак М. С.**  
(ДДМА, м.Краматорськ, Україна)

У виробничій сфері транспортним механізмам відведена фундаментальна роль, адже вони виконують функцію своєрідної «кровоносної системи» будь-якого промислового комплексу. Значущість цих систем не підлягає сумніву, оскільки функціонування сучасних потокових та автоматизованих ліній, організація міжцехової та внутрішньоцехової логістики, а також складські та перевалочні операції нерозривно пов'язані з використанням різноманітних транспортних засобів. Саме вони гарантують безперебійність, ритмічність та економічну ефективність виробничих циклів.

Машинобудівна та металургійна галузі потребують широкого спектра транспортних машин та агрегатів. Їх типізація зазвичай базується на характері роботи (машини періодичної чи безперервної дії), специфіці переміщуваного вантажу та конкретних умовах експлуатації.

Ключовою проблемою вітчизняного металургійного комплексу залишається висока динамічна завантаженість обладнання, що виконує логістичні та транспортні операції. На металургійних підприємствах безперервні технологічні процеси, пов'язані з переміщенням металопрокату, обслуговуються агрегатами з нерегульованими електроприводами (ЕП). Вони функціонують у вкрай важких умовах (інтенсивні повторно-короткочасні режими (з тривалістю включення до 60%), часті пуски та гальмування), що призводить до значних надмірних навантажень, зумовлених наявністю пружних механічних зв'язків, зазорів у кінематиці та недосконалістю існуючих систем ЕП. У сукупності це спричиняє надмірні динамічні зусилля, необґрунтовані втрати електроенергії та передчасний вихід з ладу елементів електричного й механічного устаткування.

Властивостям транспортних механізмів як складних електромеханічних систем (ЕМС) присвячена значна кількість досліджень, де розглядаються питання аналізу динаміки руху в окремих ланках, оцінки впливу типу електродвигуна та системи ЕП на енергетичні характеристики машин, а також синтезу систем керування. Загалом ці роботи спрямовані на побудову систем керування, оптимальних за динамікою руху, але в них переважно пропонуються традиційні методи синтезу систем автоматичного керування (САК) і не забезпечується мінімізація енергоспоживання, що дозволяє отримати лише часткові або локальні технічні рішення. У зв'язку з цим, пошук можливостей для покращення енергетичних та динамічних характеристик ЕП у межах модернізації діючих або проектування нових транспортних механізмів є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи полягає в дослідженні теоретичних аспектів удосконалення властивостей електромеханічних систем транспортних механізмів для забезпечення оптимальних режимів їх функціонування.

Одним з питань в контексті обраного напрямку досліджень є аналіз впливу на властивості ЕМС налаштувань САК, що багато в чому залежить від представлення асинхронного двигуна (АД). Математичний опис АД є основою для моделювання та проектування систем керування. Найбільш поширеною є модель АД у системі координат, що обертається, оскільки вона дозволяє перетворити рівняння зі змінними коефіцієнтами (трифазна система) на рівняння з постійними коефіцієнтами (двофазна система), що значно спрощує аналіз і синтез регуляторів.

При подачі на статор нерухомого АД синусоїдальної напруги виникають коливання електромагнітного моменту. Низька структурна стійкість математичної моделі АД, що відповідає коливальному характеру процесів, які відбуваються в реальному двигуні, пов'язана з наявністю у структурній схемі перехресних зв'язків. Аналіз літературних джерел [1-4], результати комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень свідчать, що в системах векторного керування АД внаслідок компенсації дії внутрішніх перехресних зв'язків, що виконується САК, стійкість ЕП значно підвищується.

Залишаються актуальними питання розробки методів підвищення стійкості асинхронного частотного ЕП при скалярному керуванні. Відомо, що для зниження рівня коливань в електромеханічних системах розроблено та успішно застосовуються різні методи корекції. Отже, для зниження коливань моменту АД в динамічному режимі необхідно вводити додаткові ланки, що коригують, компенсують коливання і підвищують стійкість ЕП.

В рамках досліджень було проведено аналіз того, як впливає на властивості ЕМС корекція сигналів керування, що подаються на АД. Зокрема, сигнал швидкості впливає на процеси у внутрішньому замкнутому контурі АД, при цьому можна швидко впливати на величину швидкості шляхом миттєвої зміни частоти напруги статора, що вимагатиме при побудові САК асинхронним ЕП з покращеними динамічними властивостями реалізації коригуючого впливу в каналі регулювання частоти. Подібний метод регулювання абсолютного ковзання відомий, але застосування стабілізації різниці частот обертання ротора та магнітного поля не дозволяє досягти придушення коливань моменту АД.

Колівання електромагнітного моменту АД, що працює в системі частотного скалярного керування, можна обмежити, використовуючи інші методи корекції, серед яких можна відзначити реалізацію від'ємних зворотних зв'язків по змінних двигуна, які вимірюються або розраховуються, що дозволить впливати на миттєві значення напруги статора.

Реалізація можливих каналів корекції – частоти та напруги може бути здійснена за допомогою спостерігача моменту АД, що дозволяють покращити його динаміку.

Коригуючий сигнал по напрузі можна сформувавши без прямого виміру електромагнітного моменту непрямим шляхом на підставі розрахунку електромагнітного моменту двигуна.

Для асинхронних ЕП з векторним керуванням, що живляться від перетворювача частоти з автономним інвертором напруги та мають низький коефіцієнт використання по моменту, актуальним є питання підвищення енергоефективності шляхом застосування коригуючого пристрою, що забезпечує регулювання поздовжньої (намагнічувальної) складової струму статора.

Підсумком початкового етапу досліджень є розуміння того, що підвищення енергетичних показників частотних асинхронних ЕП зі скалярним та векторним управлінням, що працюють при неповному статичному навантаженні двигунів, може бути отримано за рахунок введення систем корекції, дія яких спрямована на оптимізацію взаємної орієнтації векторів змінних двигуна, що визначають його момент, а також з'ясовано, що стійкість асинхронного ЕП може бути підвищена в результаті введення в САК коригувальних пристроїв, дія яких спрямована на компенсацію коливань, спричинених впливом внутрішніх перехресних зв'язків між змінними АД.

Отримані результати досліджень свідчать про те, що впровадження як нових, так і модернізація діючих ЕП, з одного боку, повинні бути спрямовані на усунення основних факторів, що викликають надмірні навантаження в елементах механічного обладнання, які впливають на працездатність і продуктивність транспортних механізмів, тобто потрібно приділяти увагу механічній системі ЕП. Для більш широкого використання систем асинхронного ЕП зі скалярним керуванням для транспортних механізмів металургійного виробництва необхідно коригувати їх динамічні характеристики. Підвищення енергетичних показників частотних асинхронних ЕП зі скалярним та векторним керуванням, що працюють при неповному статичному навантаженні двигунів, може бути отримано за рахунок введення систем корекції, дія яких спрямована на оптимізацію взаємної орієнтації векторів змінних двигуна, що визначають його момент. При цьому необхідно використовувати досконалі математичні моделі, які дозволять в повній мірі врахувати всі змінні та характер їх варіацій, а в якості універсальної контрольованої змінної доцільно використовувати кут відхилення вектору статора струму від вектору потокозчеплення ротора.

**Література:** 1. Задорожня І. М., Задорожній М. О. Оптимізація та взаємозв'язки параметрів двомасових електромеханічних систем [Електронний ресурс] : монографія – Електрон. текст. дані (4,5 Мб). – Краматорськ : ДДМА, 2021. 2. Broun John Phillip. Air cond., Variable-speed solutions. *Hear and Refrig. News*. 2003. 219, № 4.с.10, 12. – 134. 3. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 2: результаты тестирования. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2011. Вип. 2/2011 (14). С. 17 – 21. 4. Bose B. K. *Modern power electronics and AC drives*. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 pp.

## КОМПЛЕКСНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА СТРУКТУРИ І СТІЙКОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

<sup>1</sup>Захаров А. В., <sup>2</sup>Рибалко І. М., <sup>2</sup>Тіхонов О. В.

*(<sup>1</sup>Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж імені В.І. Вернадського, м. Харків, Україна, <sup>2</sup>Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна)*

Ефективність відновлювальних покриттів для робочих органів ґрунтообробних машин доцільно оцінювати не за одним ізольованим показником, а за сукупністю структурних, механічних, трибологічних і експлуатаційних критеріїв. Твердість, мікроструктура або результат короткочасного випробування на зношування самі по собі не завжди відображають поведінку деталі в реальному ґрунтовому середовищі. У процесі роботи леміші та культиваторні стрілчасті лапи зазнають дії абразивних частинок, локальних ударних навантажень, змінної вологості ґрунту, коливань глибини обробітку та нерівномірного контакту з мінеральними включеннями. Тому експериментальна перевірка покриття повинна поєднувати лабораторне встановлення механізму зміцнення з польовим підтвердженням ресурсу.

Мета комплексної оцінки полягає у встановленні зв'язку між технологією електрошлакового наплавлення, структурним станом наплавленого шару та фактичною здатністю поверхні протидіяти абразивному й ударно-абразивному руйнуванню. Такий підхід особливо важливий для відновлених деталей, у яких поверхневий шар має не лише компенсувати втрату металу, а й забезпечувати стабільне збереження геометрії робочої крайки. Практична цінність дослідження полягає в тому, що покриття розглядається як функціональна система з прогнозованими властивостями, а не як випадковий результат нанесення додаткового шару металу.

При комплексній експериментальній оцінці наплавлене покриття доцільно розглядати як багатокомпонентну систему. Металева матриця забезпечує несучу здатність, зв'язність і сприйняття змінних навантажень, а дисперсні тверді фази формують бар'єр проти мікрорізання, борознування та локального викришування. Якщо такі фази розподілені нерівномірно, покриття може мати високу середню твердість, але втрачати стабільність у зоні локального навантаження. Отже, поряд із числовими значеннями твердості необхідно аналізувати однорідність структури, характер перехідної зони та можливі дефекти металургійного походження.

Першим етапом експериментального контролю є металографічне дослідження наплавленого шару і перехідної зони. На цьому етапі оцінюють щільність покриття, наявність пор, мікротріщин, неметалевих включень, характер кристалізації та ступінь подрібнення структури. Для модифікованих електрошлакових покриттів бажаним є формування дрібнозернистої основи з рівномірним розташуванням зміцнювальних фаз. Така будова зменшує

ймовірність швидкого розвитку тріщин і перешкоджає утворенню широких зон інтенсивного пластичного зсуву під дією абразиву. Додатково контролюється перехідна зона, оскільки вона визначає міцність зчеплення покриття з основним металом.

Другим етапом є вимірювання твердості та мікротвердості. Для серійних робочих органів типовим є нижчий рівень твердості, тоді як відновлені та зміцнені електрошлаковим наплавленням деталі демонструють суттєве підвищення цього показника. За результатами досліджень діапазон твердості модифікованих шарів становив 56–62 HRC, тоді як для серійних деталей фіксувався рівень 40–42 HRC. Така різниця є важливою не лише як механічна характеристика, а й як непрямий індикатор зміни структурного стану поверхневого шару.

Водночас підвищення твердості не може бути єдиним критерієм якості. Надмірне прагнення до максимальної твердості без урахування тріщиностійкості є небезпечним, оскільки ґрунтообробні робочі органи зазнають не тільки стирання, а й ударних дій. У цьому разі покриття повинно поєднувати опір мікрорізанню з достатньою здатністю сприймати короточасні перевантаження без крихкого руйнування. Тому результати вимірювання твердості мають інтерпретуватися разом із даними металографічного аналізу та характером пошкодження поверхні після випробувань.

Третій етап пов'язаний із випробуваннями на зносостійкість. На цьому етапі доцільно враховувати не тільки масову втрату матеріалу, а й зміну профілю різальної частини, збереження ширини робочої крайки, характер поверхневих пошкоджень і стабільність властивостей після навантаження. У порівняльних випробуваннях відновлені деталі демонстрували зростання зносостійкості приблизно до 140 % відносно базового рівня серійних зразків. Для окремих модифікованих композицій у публікаційних результатах зафіксовано підвищення опору зношуванню до 44 %.

Одержані результати свідчать, що ефект підвищення стійкості формується не лише за рахунок збільшення твердості. Визначальне значення має поєднання дисперсного зміцнення, стабілізації металевої матриці, рівномірного розподілу твердих фаз і зменшення схильності поверхні до локального руйнування. За такої структури абразивна частинка не руйнує покриття шляхом глибокого мікрорізання, а взаємодіє з більш стійкою поверхнею, яка повільніше втрачає геометрію робочої крайки.

Польові випробування є завершальним і найбільш показовим етапом перевірки. Вони дозволяють оцінити покриття в умовах, які складно повністю відтворити лабораторно: змінна вологість ґрунту, наявність кам'янистих включень, коливання швидкості руху агрегату, нерівномірна глибина ходу та динамічні перевантаження. Для культиваторних лап і плужних лемішів важливо фіксувати не тільки зменшення зносу, а й здатність деталі зберігати технологічну функцію протягом усього періоду напрацювання.

За результатами випробувань встановлено підвищення експлуатаційного ресурсу до 40 % порівняно з традиційними способами відновлення. Практичне

значення цього результату полягає у зменшенні частоти заміни робочих органів, скороченні простоїв машинно-тракторних агрегатів і стабілізації якості обробітку ґрунту.

Важливою перевагою комплексного експериментального підходу є можливість виявляти причини відхилень між лабораторними та польовими результатами. Якщо покриття має високу твердість, але недостатньо стабільне в експлуатації, причину слід шукати у структурній неоднорідності, надмірному проплавленні, дефектах перехідної зони або невідповідності складу модифікатора конкретному механізму зношування. Якщо ж лабораторні показники узгоджуються з польовим ресурсом, технологію можна розглядати як відтворювану та придатну для практичного впровадження.

Таким чином, достовірна оцінка наплавлених покриттів повинна будуватися за принципом послідовного підтвердження: спочатку встановлюється структурна придатність шару, далі перевіряються його механічні та трибологічні властивості, а завершальним критерієм є стабільність роботи деталі в реальному ґрунтовому середовищі. Саме поєднання цих етапів дає змогу обґрунтовано оцінити ефективність електрошлакового наплавлення для відновлення робочих органів ґрунтообробних машин.

Висновки. 1. Експериментальне оцінювання відновлювальних покриттів має бути багаторівневим і включати структурний, механічний, трибологічний та польовий контроль. 2. Підвищення твердості до 56–62 HRC і збільшення зносостійкості до рівня близько 140 % від базового показника підтверджують ефективність модифікованих шарів, але остаточним критерієм залишається польовий ресурс. 3. Найбільш достовірною є така схема випробувань, у якій лабораторні результати пояснюють механізм зміцнення, а експлуатаційні випробування підтверджують його практичну стабільність.

#### **Література:**

1. Student M. M., Voytovych A. A., Sirak Ya. Ya. et al. Development of new electrode materials, methods of restoration and protection of thin-walled parts under abrasive and gas-abrasive wear. *The Paton Welding Journal*. 2020. No. 10. P. 31–34. DOI: 10.37434/tpwj2020.10.06.

2. Tekeste M. Z., Balvanz L. R., Al-Aani F. et al. Hardened edges effects on wear characteristics of cultivator sweeps using circular soil bin test. *Journal of Tribology*. 2022. Vol. 144, No. 2. 024501. DOI: 10.1115/1.4050805.

3. Tulaganova L., Yunushuzhaev S., Juraeva G. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2373. 022026. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022026.

4. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2024. № 6(149). С. 166–173. DOI: 10.32782/1995-0519.2024.6.20.

5. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В. Зносостійкість та ресурс відновлених і зміцнених електрошлаковим наплавленням лемішів і культиваторних стрілочастих лап. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 4(497). С. 20–27. DOI: 10.15589/znp2024.4(497).4.

6. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В. Вплив складу модифікуючих присадок на формування структури та зносостійкості наплавлених шарів при електрошлаковому наплавленні. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2026. Вип. 1(156), ч. 1. С. 227–234. DOI: 10.32782/1995-0519.2026.1.1.28.

## ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ РОТАЦІЙНОГО ВИДУ

**Зінченко І.Б.**

*(ТНТУ імені І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна)*

Формування регулярних мікрорельєфів на плоских робочих поверхнях деталей машин дозволяє забезпечити їм ряд експлуатаційних властивостей таких як: збільшення маслоємності поверхні, покращену корозійну стійкість, зменшення коефіцієнта тертя, збір продуктів зносу, збільшення ресурсу, поверхневе зміцнення, керованість параметрів, антифрикційність та герметичність.

Разом з цим формування регулярних мікрорельєфів синусоподібної чи трикутної форми вимагає використання дорогих верстатів з числовим програмним керуванням для забезпечення регулярності та параметрів точності мікрорельєфу. Існує також технологія формування мікрорельєфів із канавками у вигляді циклоїди, яка може бути реалізована практично на будь-якому верстаті, який забезпечує обертовий рух шпинделя та рух подачі стола або шпинделя. Технологія формування таких мікрорельєфів та її обґрунтування описано в роботах [1-3]. Формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях не викликає жодних технічних проблем та широко використовується в машинобудуванні.

Метою роботи є аналіз факторів для проведення експериментальних досліджень при формуванні регулярних мікрорельєфів ротаційним способом.

Одним з основних експлуатаційних параметрів робочої поверхні який покращується в процесі формування мікрорельєфу є мікротвердість. Саме цей параметр буде залежним параметром на який буде досліджено вплив незалежних факторів. Для забезпечення достовірності результатів експериментальних досліджень їх планується проводити на верстаті HAAS VF-6B/40HE.

Дослідження будуть проводитися із застосуванням планування повнофакторного експерименту з трьома незалежними факторами:

- діаметр деформувального елемента – який заплановано змінювати в діапазоні 8, 10 та 12 мм.

- зусилля деформування – його заплановано змінювати від 30 до 90Н з кроком 30 Н.

Третім параметром експериментальних досліджень обирають швидкість деформування з якою деформувальний елемент рухається відносно поверхні. Однак при формуванні мікрорельєфів ротаційного виду швидкість деформування в різних точках канавки буде різною. В точці *A* горизонтальна складова швидкості обертання деформувального елемента буде сумуватись з швидкістю подачі. Таким чином сумарна горизонтальна швидкість деформувального елемента буде максимальною. В точці *B* горизонтальна складова швидкості обертання та швидкість подачі шпинделя будуть спрямовані в протилежні сторони. Таким чином сумарна швидкість точки *A* буде мінімальною.

Таким чином швидкість деформування не може бути вихідним параметром для проведення експериментальних досліджень, оскільки сам цей параметр змінюється при формуванні однієї і тієї ж канавки.

Тому доцільно буде обрати інший параметр який чинить вплив на мікротвердість поверхні із сформованим мікрорельєфом та є пов'язаний з іншими вихідними параметрами. Таким параметром є відстань сформованих канавок від точки

Профіль утвореної канавки залежить від поєднання частоти обертання деформувального елемента, швидкості подачі та радіуса обертання деформувального елемента навколо осі обертання (рис. 1).

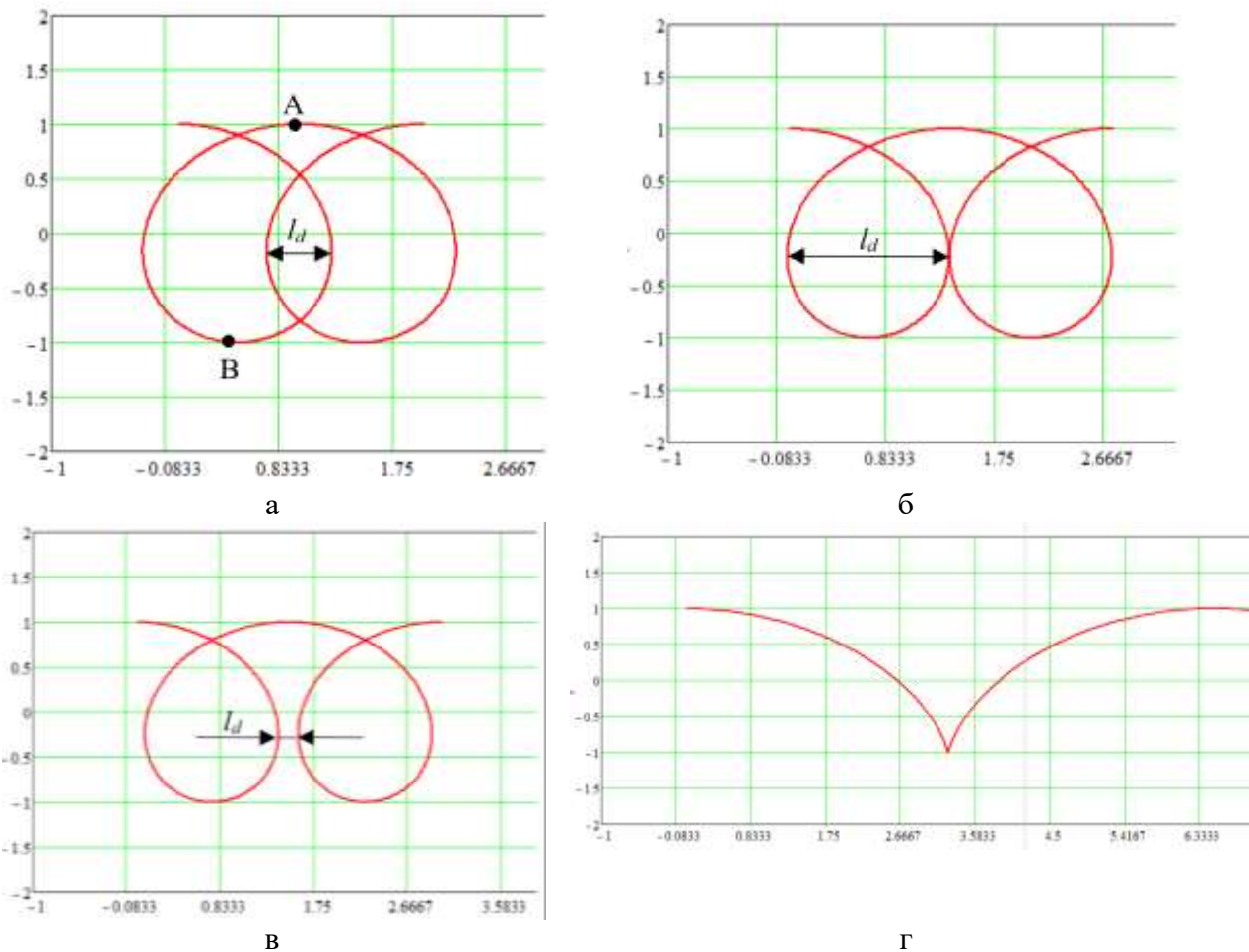


Рис. 1. Трансформація форми канавки мікрорельєфу при частоті обертання шпинделя інструменту з деформувальним елементом  $n_g=1$  об/с та зміні величини подачі  $f_g$ : а – 1 мм/с; б – 1,37 мм/с; в – 1,5 мм/с; г – 6,5мм/с

Однак аналогічні форми канавок можна отримати і при зміні частоти обертання шпинделя верстату при незмінній подачі. Наприклад якщо встановити подачу на рівні  $f_g = 1$  мм/с, то для отримання аналогічних форм канавок частота обертання шпинделя з деформувальним елементом  $n_g$  буде наступною: рис. 1а – 1 об/с; рис. 1б – 0,73 об/хв; рис.1в – 0,66 об/хв; рис.1г – 0,15 об/с.

Таким чином для проведення експериментальних досліджень в якості вихідних параметрів обрано діаметр деформувальних елементів, зусилля деформування та відстань від середини канавки до точки заміру мікротвердості.

#### Література:

1. Спосіб формування регулярних мікрорельєфів ротатійного виду : пат. 161387 Україна : В23Р9/00. Дзюра В.О., Бица Р.О., Марушак П.О., Марушак К.П., Марушак О.В., Зінченко І.Б. заявл. 27.12.2024. опубл. 03.12.2025, бюл. № 49/2025.
2. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Bytsa, R.; Zinchenko, I. Partially Regular Microreliefs Formed by Rotation. Constr. Mater. 2025, 5, 2. <https://doi.org/10.3390/constrmater5010002>
3. Kovács, Zsolt & Kónya, Gábor & Markó, Balázs & Póka, György. (2025). Experimental and Theoretical Investigation of the Influence of Tool Paths and Burnishing Parameters on the Quality of the Burnished Surface by Magnetic Assisted Ball Burnishing. Results in Engineering. 27. 105779. 10.1016/j.rineng.2025.105779

# МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОЇ ВИРОБНИЧОЇ СИТУАЦІЇ

Калініченко В. В., Сазонов Т.О.  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Проблема раціонального використання енергії у машинобудуванні набуває у наш час усе більшої ваги. Відтак, до різноманітних процесів машинобудівного виробництва і, зокрема, процесів механічної обробки, крім інших вимог все частіше висувуються вимоги високої енергоефективності. Забезпечення високих показників енергоефективності має особливе значення для високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах. Вказані обставини зумовлюють актуальність науково-практичних досліджень характеристик енергоефективності токарної обробки на важких верстатах з метою обґрунтування енергоефективних умов та режимів обробки.

Вирішення задачі пошуку енергоефективних умов та режимів токарної обробки передбачає розробку та реалізацію оптимізаційної моделі (ОМ) процесу обробки (ПО), побудованої на базі використання енергетичного критерію (ЕК) оптимізації, що враховує питомі витрати енергії на перебіг фізичних процесів у зоні різання. Прикладами такого ЕК можуть бути критерії мінімуму питомої енергомісткості різання  $e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{N_{\text{еф}}}{P_{\text{різ}}} = \frac{N_{\text{еф}}}{v \cdot s \cdot t} \rightarrow \min$  або максимуму продуктивності різання, співвіднесеної до одиниці витрат енергії у зоні різання  $P_{\text{різ}_e} = \frac{P_{\text{різ}}}{N_{\text{еф}}} = \frac{1}{e} \rightarrow \max$ , де  $A_{\text{різ}}$  – робота різання;  $V$  – об'єм зрізаного шару заготовки, перетворюваного на стружку;  $N_{\text{еф}}$  – ефективна потужність різання;  $P_{\text{різ}}$  – продуктивність різання (об'єм матеріалу стружки, що видаляється за одиницю часу);  $v$  – швидкість різання;  $s$  – подача;  $t$  – глибина різання. У якості ЕК можуть використовуватися й інші критерії.

Загальна структура ОМ ПО передбачає вирішення оптимізаційної задачі  $Q = \text{extr}\{f(x, \omega) | x \in D\}$  з системою обмежень  $g(x, \omega) \leq 0$ ;  $f(x) \leq 0$ ;  $a_i \leq x_i \leq b_i$ , де  $f(x, \omega)$  – цільова функція ОМ;  $x$  – керовані параметри ПО;  $\omega$  – постійні вхідні параметри ПО;  $D$  – область припустимих значень керованих параметрів  $x$ .

Мінімізація питомих витрат енергії на зняття стружки та утворення обробленої поверхні деталі забезпечується за рахунок чинників, що знижують силове навантаження у зоні різання при зменшенні величини  $P_z$ . Тому реалізація ОМ ПО передбачатиме вираження зв'язку ЕК з керованими та постійними вхідними параметрами ПО через ступеневі залежності  $P_z$  від цих параметрів. Наведена у довідковій літературі інформація про такі ступеневі залежності вже застаріла; вона не враховує як появи нових оброблюваних та інструментальних матеріалів, так і можливостей розширення діапазону використовуваних режимів різання при впровадженні нового технологічного обладнання. Та ж інформація, що міститься у виданнях та на вебресурсах фірм-виробників різального

інструменту, часто стосується обробки лише найбільш розповсюджених груп матеріалів. Отримання ступеневих залежностей  $P_z$  від керованих та постійних вхідних параметрів ПО за відсутності необхідної апріорної інформації потребує значного обсягу тривалих та дороговартісних експериментальних досліджень, які з економічних міркувань не можуть собі дозволити навіть підприємства зі значними фінансовими ресурсами.

Успішне вирішення зазначеної проблеми може бути досягнуте за рахунок проведення досліджень у режимі реальної виробничої ситуації. Верстатний парк підприємств важкого машинобудування зараз представлений, як правило, важкими верстатами з ЧПК. Сучасні системи ЧПК верстатів, зокрема, важких токарних, побудовані на базі промислових комп'ютерів, що передбачають можливість встановлення додаткових програмних продуктів, апаратних засобів (у тому числі різних датчиків для діагностики ПО) та інтеграції до локальної (глобальної) комп'ютерної мережі. При цьому кожен верстат з ЧПК, оснащений засобами діагностики, стає своєрідним дослідницьким комплексом з автоматизованого моніторингу ПО, а на базі сукупності таких верстатів можна створити вже цілу мережу таких комплексів, які будуть збирати дані про характеристики ПО у реальному часі, майже не заважаючи звичайному ходу виконання виробничої програми. Кожна технологічна операція, перехід або прохід при цьому перетворюється на експеримент, виконаний у режимі реальної виробничої ситуації. Результати таких експериментів, отримані у вигляді масивів діагностичних даних, накопичуються у пов'язаній з усіма комп'ютерними пристроями верстатних комплексів централізованій базі знань (БЗ) створюваної самонавчальної системи (СНС). У цій же БЗ СНС міститимуться дані про характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів, а також інші дані, необхідні для визначення енергоефективних режимів різання, в тому числі результати попередніх досліджень. Отримання ступеневих залежностей  $P_z$  від керованих та постійних вхідних параметрів ПО здійснюватиметься за допомогою регресійного аналізу. Можливості сучасних комп'ютерних засобів дозволяють збільшити кількість факторів та порядок регресійної залежності порівняно з моделями, традиційно використовуваними для призначення режимів різання у довідковій літературі. Корекція залежностей при накопиченні нових отриманих датчиками даних забезпечує постійне зростання їхньої точності. Алгоритми ОМ для визначення характеристик енергоефективності ПО передбачатимуть використання у своїх розрахунках показників ступеня у отриманих ступеневих залежностях.

Перевагами дослідження характеристик енергоефективності токарної обробки на важких верстатах у режимі реальної виробничої ситуації є:

- економія матеріальних ресурсів та часу на виконання спеціальних експериментів за рахунок проведення досліджень безпосередньо під час виконання виробничої програми;
- можливість збільшення числа факторів, що враховуються у моделі;
- забезпечення поступового зростання точності отримуваних моделей;
- можливість поступового формування детальної бази знань про реальні процеси токарної обробки на важких верстатах.

## УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ЗІ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

**Кінденко М. І.**

*(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)*

Дія імпульсних магнітних полів на осьовий інструмент зі швидкорізальних сталей є ефективною тільки при певних (оптимальних) режимах магнітної обробки (напруженості магнітного поля, часу обробки інструменту і часу витримки після обробки).

Оптимальні режими магнітної обробки, при яких досягається найбільше підвищення стійкості різального інструменту і максимальне поліпшення властивостей інструментального матеріалу співпадають. В результаті магнітної обробки швидкорізальна сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне тверднення, стає одноріднішою по структурі і покращує свої фізико-механічні властивості [1].

Складність керування процесом магнітно-імпульсної обробки (МІО) полягає в тому, що необхідно одночасно здійснювати керування кількома параметрами.

Наявність апріорно заданих режимів МІО часто призводить до зниження якості обробки, оскільки під час програмування не можуть бути враховані особливості МІО конкретної деталі і розрахунок ведеться за усередненими середньостатистичними даними. Разом з тим, у багатьох випадках оптимальні режими МІО є унікальними для конкретного зразка виробу.

Оскільки ефективність процесу МІО безпосередньо залежить від точності вибору режимів, виникає необхідність розв'язання задачі оптимального управління режимами - сукупності числових значень кількох параметрів, основними з яких є: напруженість магнітного поля, час імпульсу в серії, частота проходження імпульсів, кількість імпульсів у серії, інтервал між імпульсами в серії, кількість серій імпульсів.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що для подолання зазначених недоліків необхідна наявність інтелектуальної системи управління, що дає змогу оптимізувати процес оброблення кожної деталі, що визначає умови та якість процесу МІО. Управління процесами МІО в інтелектуальній системі управління МІО може бути здійснено за допомогою методів штучного інтелекту.

Сьогодні використання сучасних інтелектуальних технологій, таких як нейронні мережі та штучний інтелект, є передумовою проактивного розвитку всіх сфер діяльності людини.

Методи та засоби штучного інтелекту доходять до споживача у вигляді інтелектуальних технологій, які практично інваріантні до тієї чи іншої проблемної області. Інтелектуальні технології успішно використовуються для створенні складних систем управління. Вимоги до пристроїв управління – забезпечувати надійне управління об'єктом в різних режимах його роботи.

Доцільність застосування генетичних алгоритмів під час оптимізації режимів МІО обґрунтовано тим, що на практиці складно зафіксувати властивості функціональної залежності вихідних параметрів режимів МІО від вхідних величин, ще складніше зробити аналітичний опис такої залежності. Генетичний метод утворює клас алгоритмів пошукової оптимізації, заснованих на математичному моделюванні біологічних механізмів і процесів у живій природі за допомогою принципів популяційної генетики, що дають змогу знаходити оптимальні або близькі до них (субоптимальні) рішення [2].

Доцільність застосування нечіткої нейромережі в системі управління МІО зумовлена необхідністю класифікації даних, що використовуються під час обробки [6,7]. Ефективно вирішити задачу моделювання та прогнозування результатів МІО. Використовувати апіорну інформацію, здобувати нові знання і бути для користувача логічно прозорими. Значну роль при управлінні процесом МІО має технологія об'єктивізації процесу прийняття рішень. Інформаційна невизначеність і непередбачувані умови зумовлюють раціональність застосування методів теорії нейро-нечітких систем для управління складним процесом МІО.

Перед початком обробки вводяться параметри оброблюваної деталі - матеріал заготовки і геометричні параметри деталі. Після отримання цих даних комп'ютер визначає потрібну комбінацію параметрів оброблюваної деталі з бази даних. Якщо така інформація знайдена, з бази даних витягають діапазони параметрів режимів оброблення. Якщо інформація не знайдена, проводиться пошук деталі з максимально близькими параметрами.

Після того, як визначено діапазон параметрів режимів обробки, він оптимізується за допомогою генетичного алгоритму. Після того, як визначено параметри режимів обробки, вони подаються через нечітку нейронну мережу.

Уточнені параметри подаються на модуль керування соленоїдом, після чого здійснюється процес МІО. Після обробки проводиться оцінка продуктивності, і якщо отриманий результат не задовольняє заявленому, результати обробки відправляються на навчання нечіткої нейромережі. Під час навчання нечіткої нейронної мережі відбувається зміна параметрів режимів обробки, і змінені режими подаються на МІО.

Застосування запропонованого підходу до управління МІО дасть змогу скоротити час на обробку виробів, підвищити якість МІО і скоротити витрату електроенергії, що витрачається на процес МІО.

#### **Література:**

1. Кінденко М.І. Дослідження механізму магніострикційного та магнітно-дисперсійного твердіння пробивних пуансонів із швидкорізальної сталі після обробки в імпульсних магнітних полях // *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2024. 1(53). С. 181–187, [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-\(53\)181](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-(53)181)
2. Нестеренко О.В., Савенков О.І., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: навч. посібн. / за ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління. 2016. 188 с.

## МЕТОДИ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

**Кінденко М. І.**

*(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)*

Поліпшення якості інструментів можна досягти застосуванням усіх відомих механізмів об'ємного зміцнення при термічній обробці. Дорогі методи об'ємного зміцнення не можуть бути виправдані ще і з тих позицій, що причини відмов інструментів найчастіше пов'язані не з їх поломкою, а з втратою ними своєї первісної поверхневої конфігурації внаслідок зносу, відколів, зминання, розтріскування, тобто в зв'язку з руйнуванням або деформацією тонких поверхневих шарів металу.

Саме цими обставинами пояснюється інтенсивний розвиток останнім часом чисельних методів і розробок в області поверхневого зміцнення інструментів.

Одним з основних напрямків фізичної технології є магнітна обробка матеріалів. Особливе місце в магнітній обробці відводиться способам поліпшення фізико-механічних властивостей швидкорізальних сталей. Поля локальних перенапруг в таких сталях з'являються в результаті магніострикції. У цих умовах частки карбідної фази виявляються концентраторами напружень, які зменшуються за рахунок додаткових джерел дислокацій [1].

В цілому результат магнітної обробки розглядається як прояв ефектів післядії в матеріалах, що знаходяться на межах стабільності їх властивостей і піддаються впливу зовнішнього силового поля [2].

Існує два принципово різних напрямки в розробці методів магнітної обробки різальних інструментів (рисунк 1).

Відповідно до першого з них підвищення стійкості різального інструменту, а також механічних і технологічних властивостей деталей досягається шляхом накладення на зону різання магнітного поля.

Другий напрямок передбачає вплив магнітного поля на матеріал, з якого виготовлений інструмент.

Кожне з названих напрямків реалізується на практиці чисельними способами різними як за своїми фізичними технологічним принципам, так і за конструктивним виконанням установок (таблиця 1).

Є корінна відмінність між двома зазначеними групами методів. Мова йде про характер зміни умов процесу різання при накладенні магнітного поля на зону різання і при обробці матеріалів намагніченим інструментом.

Магнітне зміцнення на основі методу магнітно-імпульсної обробки (МІО) має низку переваг, зокрема: низька собівартість оброблення, збереження геометрії оброблених деталей та екологічна чистота. Водночас слід зазначити, що ключовим моментом забезпечення ефективності МІО є правильний вибір режимів обробки. Вибір режимів є складним технічним завданням, що потребує індивідуального підходу до вирішення для кожної конкретної галузі застосування.

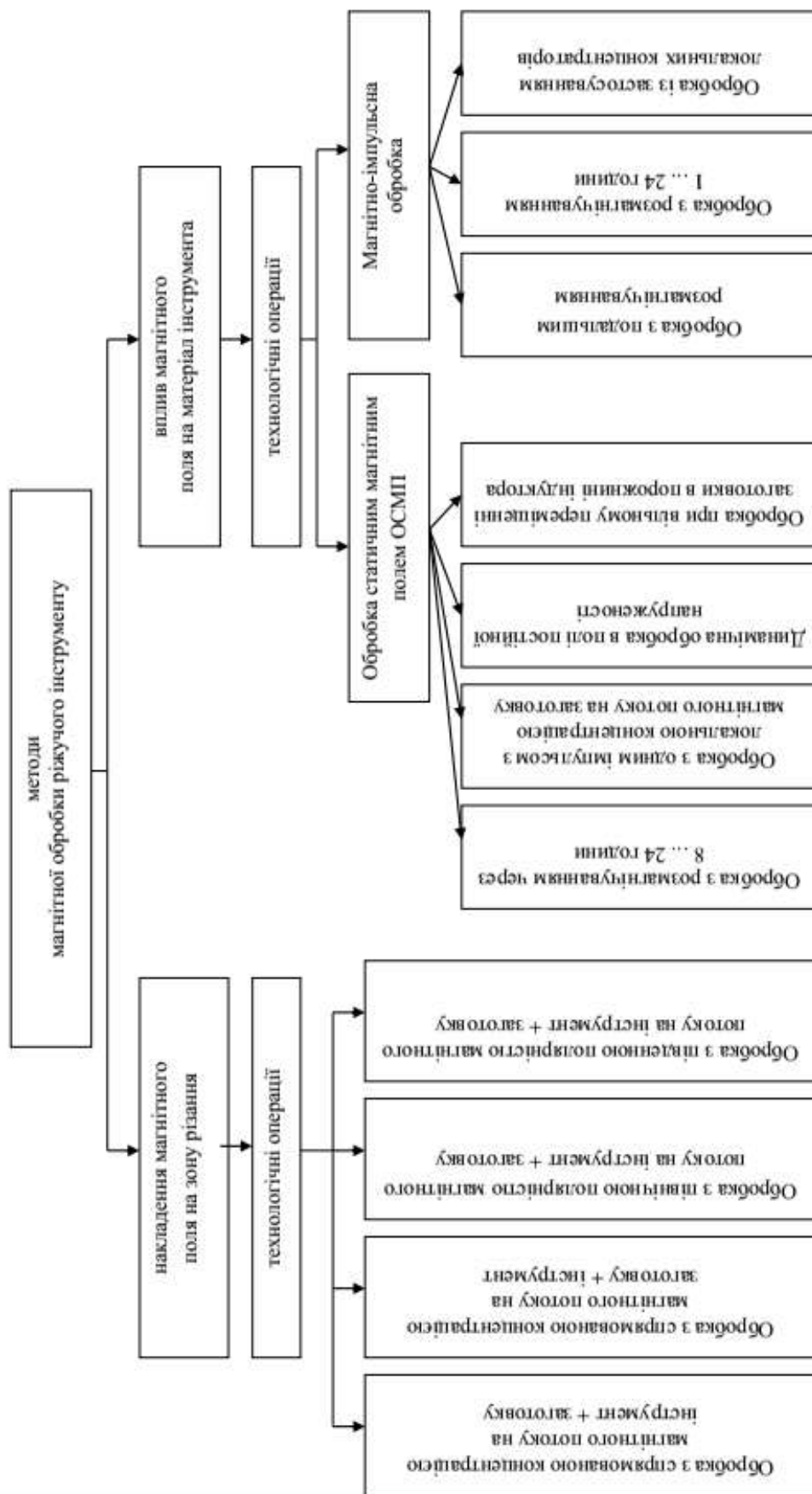


Рис. 1. Класифікація методів магнітної обробки ріжучих інструментів

Таблиця 1 – Характеристика методів магнітної обробки та області їх застосування

№ пп	Спосіб реалізації методів магнітної обробки	Інструмент	Переваги методу	Недоліки способу
1	2	3	4	5
1	1 Накладення магнітного поля на зону різання. 1.1 Обробка зі спрямованою концентрацією магнітного потоку на «інструмент + заготовка»	Різці, свердла, зенкера, мітчики, протяжки і ін.	Простота технології магнітної обробки	Підвищення зносу інструменту в порівнянні з магнітним потоком заготовка + інструмент
2	1.2 Обробка зі спрямованою концентрацією магнітного потоку на заготовку + інструмент	Різці, свердла, зенкера, мітчики, протяжки і ін.	Зниження зносу інструменту в порівнянні з магнітним потоком «інструмент + заготовка»	Зниження стійкості інструменту при обробці магнітних сталей
3	2 Магнітно-імпульсна обробка (МІО)			
4	2.1 Обробка без подальшого розмагнічування. 2.2 Обробка з розмагнічуванням 1 ... 24 години. 2.3 Обробка із застосуванням локальних концентраторів.	Різці, осьовий інструмент, протяжки, прошивки і тощо	Збільшення стійкості інструменту, підвищення теплостійкості інструменту. Повторне переточування інструменту не знижує додатковий резерв стійкості отриманої в результаті МІО	- - -

В результаті магнітної обробки швидкорізальна сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне тверднення, стає одноріднішою по структурі і покращує свої фізико-механічні властивості.

**Література:** 1. Кінденко М.І. Вплив режимів магнітної обробки інструменту зі швидкорізальної сталі на його фізико-механічні властивості // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 16–17 травня 2024 р. Кременчук, КрНУ, 2024. – С. 67-68. <https://doi.org/10.32782/2079-5106.2024.3.2> 2. Soroka O., Rodichev I., Shabetia O., Kovalov V., Vasilchenko Y., Shapovalov M. Strength of tool materials. Modern trends in material processing : collective monograph / Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja, 2018. Pp. 185–217. ISBN 978-86-6075-065-7.

## **ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ВАЖКОГО МАШИНОБУДІВНОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ЗНОСУ**

**Клименко Г.П., Рєва Є.С., Чумаченко В.П.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасне важке машинобудування характеризується широким використанням важких токарних верстатів для обробки великогабаритних і відповідальних деталей типу валів, роторів, барабанів, цапф, корпусних елементів енергетичного, металургійного, транспортного та гірничого обладнання. Особливістю таких верстатів є робота в умовах значних силових і температурних навантажень, великих мас заготовок, тривалих циклів обробки та підвищених вимог до точності формоутворення. У процесі тривалої експлуатації важких токарних верстатів відбувається зниження жорсткості технологічної системи, накопичення люфтів у напрямних і приводах, розвиток теплових деформацій, нерівномірний знос вузлів та погіршення точності переміщення виконавчих органів, що призводить до зростання похибок обробки, зниження продуктивності й скорочення ресурсу ріжучого інструмента. За таких умов традиційні системи програмного керування, що функціонують за наперед заданими режимами різання, не забезпечують стабільної якості обробки великогабаритних деталей, що обумовлює необхідність розроблення нових підходів до керування процесом точіння на основі інтегрованої діагностики технічного стану та адаптивного регулювання параметрів технологічної системи.

Одним із перспективних напрямів підвищення технологічної ефективності важких токарних верстатів є впровадження інтегрованих систем діагностики та адаптивного керування, які забезпечують безперервний моніторинг параметрів технічного стану обладнання і процесу різання з подальшим введенням коригувальних дій у режимі реального часу. На відміну від традиційних систем стабілізації окремих параметрів, запропонований підхід базується на комплексному урахуванні взаємозв'язку між жорсткістю технологічної системи, силовими і температурними навантаженнями, станом ріжучого інструмента, точністю переміщення виконавчих органів та похибками формоутворення. Це дозволяє розглядати важкий токарний верстат як єдину динамічну систему, параметри якої змінюються в процесі експлуатації і потребують постійної адаптивної корекції. Наукова новизна роботи полягає у розробленні інтегрованої

структури керування процесом точіння на важких токарних верстатах, яка, на відміну від існуючих систем, поєднує функції оперативної діагностики технічного стану обладнання, аналітичного прогнозування розвитку деградаційних процесів та адаптивного регулювання режимів різання на основі поточних параметрів технологічної системи.

Структурна схема інтегрованої системи діагностики та адаптивного керування важким токарним верстатом наведена на рисунку 1.

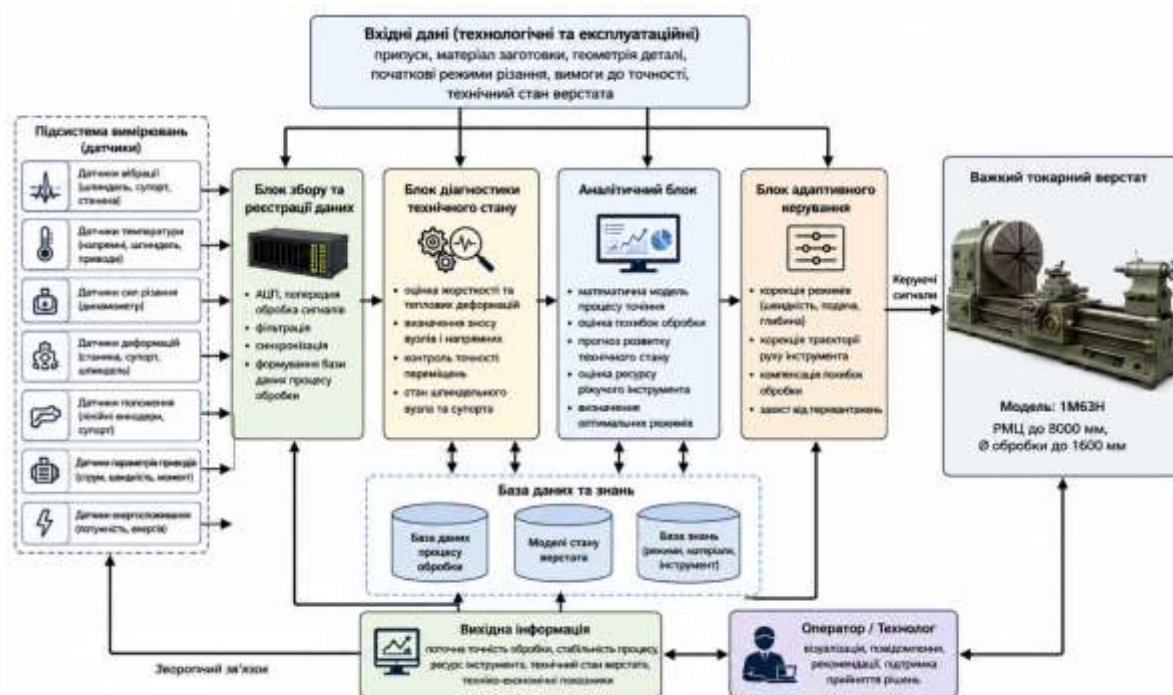


Рис. 1. Структурна схема інтегрованої системи діагностики та адаптивного керування важким токарним верстатом

Запропонована система включає підсистему вимірювань, блок збору та реєстрації даних, блок діагностики технічного стану, аналітичний блок, блок адаптивного керування, базу даних та знань, а також підсистему зворотного зв'язку з оператором. Підсистема вимірювань забезпечує контроль вібраційних характеристик шпиндельного вузла, температурного стану напрямних і супортної групи, сил різання, деформацій несучої системи, параметрів приводів і енергоспоживання. Отримані сигнали надходять до блоку збору даних, де виконується їх попередня обробка, фільтрація та синхронізація. У блоці діагностики технічного стану здійснюється оцінка жорсткісних, теплових і динамічних параметрів технологічної системи, визначається ступінь зносу

вузлів, точність переміщень виконавчих органів і поточний стан шпиндельно-супортної групи.

В аналітичному блоці на основі математичних моделей процесу точіння виконується прогноз похибок обробки, оцінка розвитку деградаційних процесів, визначення ресурсу ріжучого інструмента та розрахунок оптимальних режимів різання. На основі цих даних блок адаптивного керування забезпечує оперативну корекцію швидкості різання, подачі, глибини різання, траєкторії руху інструмента та введення компенсаційних коригувань, спрямованих на зменшення похибок формоутворення. Науково новим є запропонований принцип адаптивного керування, який базується на корекції параметрів різання не за жорстко заданою програмою, а за фактичним силовим, температурним і деформаційним станом технологічної системи, що дозволяє враховувати зміну жорсткості заготовки, нерівномірність припуску, коливання навантаження на інструмент і теплову нестабільність вузлів у процесі обробки великогабаритних деталей. Це створює передумови для компенсації похибок обробки безпосередньо в процесі формоутворення та підвищення стабільності технологічного процесу.

Практичне впровадження інтегрованої системи діагностики та адаптивного керування на важких токарних верстатах дозволяє забезпечити підвищення точності обробки великогабаритних деталей, зменшення аварійних простоїв, збільшення міжремонтного ресурсу обладнання, зниження експлуатаційних витрат і раціональне використання ресурсу ріжучого інструмента. Практична значущість і наукова новизна запропонованого підходу полягають у створенні теоретико-методичних засад переходу від регламентного керування важкими токарними верстатами до інтелектуального адаптивного керування за фактичним технічним станом, що забезпечує підвищення технологічної ефективності обробки та формує наукову основу для впровадження прогнозного технічного обслуговування у важкому верстатобудуванні. Таким чином, застосування інтегрованої системи діагностики та адаптивного керування є перспективним науково-технічним напрямом підвищення ефективності експлуатації важких токарних верстатів в умовах зростаючих вимог до точності, продуктивності та надійності технологічного обладнання.

## ОБРОБКА РІЗАННЯМ НАПЛАВЛЕНИХ ТА НАПИЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

<sup>1</sup>Клименко С.А., <sup>2</sup>Коломієць В.В., <sup>3</sup>Коваленко Я.П., <sup>1</sup>Мельнійчук Ю.О.,  
<sup>3</sup>Мельничук П.П., <sup>3</sup>Ночвай В.М., <sup>3</sup>Пилипенко О.М., <sup>3</sup>Полонський Л.Г.

(<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, <sup>2</sup>Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків, Україна, <sup>3</sup>Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна)

В монографії [1] узагальнений науковий та практичний досвід лезової обробки наплавлених і напилених покриттів високої твердості з використанням інструментів з надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору.

Показано, що сучасні технології формування деталей з покриттями повинні базуватися на вдосконалених моделях процесів їх обробки. Особливістю цього є системний підхід до проблеми обробки наплавлених і напилених матеріалів, технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару деталей з покриттями, необхідність якого стає очевидною, якщо взяти до уваги специфічні структуру і властивості оброблюваних матеріалів, їх різноманіття, широке застосування в машинобудуванні і суміжних галузях як в основному, так і в ремонтному виробництвах.

Працездатність інструментів при обробці наплавлених і напилених покриттів залежить від способу їх нанесення, показників неоднорідності шару покриття, які викликають зміну характеристик процесу різання і призводять до нестабільності параметрів якості обробленої деталі.

Гетерогенна структура наплавлених і напилених матеріалів проявляється у процесі обробки різанням вже на стадії стружкоутворення в параметрах механіки і теплофізики процесу. Структурний стан пар «матеріали інструменту і стружки», «матеріали інструменту і виробу» зумовлює контактну взаємодію у зоні різання, механізм зношування інструменту, якість поверхні та стан поверхневого шару обробленого виробу.

Структурний стан оброблюваного матеріалу є самостійним чинником, що зумовлює працездатність різального інструменту – зі зростанням неоднорідності структури оброблюваного матеріалу стійкість інструменту знижується.

Впливаючи на перебіг процесу обробки, структурні особливості наплавленого і напиленого матеріалів безпосередньо впливають на стан поверхневого шару обробленого виробу та якість обробленої поверхні, зокрема, на її шорсткість. При цьому ступінь однорідності оброблюваного матеріалу також є самостійним фактором, який обмежує можливості з управління шорсткістю оброблюваної поверхні, не дозволяючи сформуванню шорсткості оброблюваної поверхні з параметрами, що нижчі за допустимі структурним станом оброблюваного матеріалу.

Таким чином, структурний стан матеріалу покриття значною мірою обумовлює його оброблюваність різанням – збільшення неоднорідності оброблюваного матеріалу призводить до зниження швидкості різання, що відповідає заданій стійкості інструменту.

У зв'язку із зазначеним, технологічна собівартість процесу обробки виробів із покриттям зумовлена не тільки режимами різання і витратами на організацію процесу обробки, а й структурним станом оброблюваного матеріалу. При цьому ступінь впливу структурного стану оброблюваного матеріалу збільшується при зниженні швидкості різання. Це підтверджує відомий експериментально встановлений факт підвищення загальної ефективності обробки матеріалів із гетерогенною структурою зі зростанням швидкості різання.

Поліпшення оброблюваності неоднорідних покриттів досягається шляхом мікролегування їх матеріалу хімічними елементами, шляхом раціонального вибору технології наплавлення і напилення, застосування термомеханічної обробки, вибору матеріалу інструменту, оптимізацією режимів різання і геометричних параметрів інструменту, шляхом застосування спеціальних ЗОР і технологічних середовищ. Великі перспективи має комбінована обробка деталей з покриттям, яка розглядається на прикладі обробки з примусовими вібраціями. При цьому ефективність різання покриттів підвищується не лише за рахунок зміни кінематики процесу обробки, але і за рахунок додаткової енергетичної дії на зону різання – у даному випадку, її акустичного опромінення.

Виконаний комплекс досліджень дозволив розробити науково-обґрунтовані рекомендації по вибору матеріалів і геометричних параметрів різальних інструментів, елементів режиму різання, технологічного середовища і технологічних способів поліпшення оброблюваності різанням ряду наплавлених і напилених покриттів з різним ступенем, характеристиками неоднорідності та фізико-механічними властивостями, які були використані у виробництві, як при виготовленні нових, так і при відновленні зношених деталей з покриттями.

Великі перспективи у напрямку підвищення ефективності механічної обробки деталей з покриттями пов'язані з розвитком досліджень, що об'єднують матеріалознавчі роботи по визначенню показників гетерогенної структури і специфічних властивостей наплавлених і напилених матеріалів з технологічними і трибологічними дослідженнями особливостей контактної взаємодії інструменту із стружкою і оброблюваною деталлю, з урахуванням впливу довкілля, в зоні різання. Результати таких робіт є основою для створення нових матеріалів для оснащення різальних інструментів, конструкцій різальних інструментом, перспективних технологій механічної і комбінованої обробки, що забезпечують високу продуктивність і формування в поверхневому шарі деталей стану, що відповідає умовам експлуатаційного навантаження.

У 2-му виданні монографії поширене застосування положень «фрактальної» теорії різання на процеси обробки наплавлених і напилених матеріалів, наведено нові дані з технологічного забезпечення якості поверхневого шару деталей та розглянуто економічні питання виготовлення деталей із покриттям.

**Література:** 1. Обробка різанням деталей з покриттям. 2-е вид., перероблене та доповнене / С. А. Клименко, В. В. Коломієць, Я. П. Коваленко, Ю. А. Мельничук, П. П. Мельничук, В. М. Ночвай, А. М. Пилипенко, Л. Г. Полонський; під заг. ред. С. А. Клименка, Л. Г. Полонського. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка» МОН України, 2026. – в друці.

## ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У МАШИНОБУДУВАННІ В УМОВАХ INDUSTRY 5.0

**Ковалевський С.В.**

(ДДМА, м.Краматорськ, Україна)

Парадигма Industry 5.0, на відміну від попередньої хвилі автоматизації, ставить у центр людиноцентричність та сталий розвиток. Для цифрових двійників (ЦД) це означає переосмислення ролі двійника як активного учасника виробничого процесу. Серед найбільш значущих трендів виділяються:

- гібридне моделювання (Grey-box), при якому поєднання фізичних законів з нейронними мережами (PhysiNet) дозволяє ЦД ефективно функціонувати навіть на початку життєвого циклу виробу, коли накопичених даних ще недостатньо для чистого машинного навчання [1];
- інтеграція великих мовних моделей (LLM) забезпечує автоматизовану генерацію архітектур ЦД, аналіз неструктурованих технологічних документів та природномовні інтерфейси між оператором і системою [2];
- промисловий метавсесвіт та XR активує платформи NVIDIA Omniverse для спільного 3D-проектування заводів у реальному часі [3];
- 5G та Edge Computing забезпечує низьку затримку для замкнених контурів керування високошвидкісними процесами [1];
- розвиток моделі «Цифровий двійник як сервіс» для малих і середніх підприємств без великих інвестицій у власну ІТ-інфраструктуру.

Результати порівняння підходів до моделювання ЦД наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння підходів до моделювання ЦД у машинобудуванні

Критерій	Фізична модель (White-box)	AI-модель (Black-box)	Гібридна (Grey-box)
Точність при малих даних	Висока	Низька	Висока
Час обчислення (реал. час)	Незадовільний	Відмінний	Добрий
Потреба в експертизі	Висока	Середня	Середня
Інтерпретованість результатів	Висока	Низька	Середня
Адаптивність до нових даних	Низька	Висока	Висока

Як видно з таблиці 2, гібридна Grey-box архітектура є оптимальним компромісом для виробничих застосувань: вона поєднує фізичну обґрунтованість моделі з адаптивністю AI, не жертвуючи інтерпретованістю результатів — що принципово важливо для сертифікації та впровадження у регульованих галузях машинобудування [1, 4].

У результаті систематичного аналізу наукових джерел встановлено, що розвиток цифрових двійників у машинобудуванні проходить чіткі еволюційні фази — від домінування фізичних моделей до гібридних підходів і промислового

метавсесвіту. На підставі проведеного дослідження сформульовано чотири пріоритетні завдання, вирішення яких визначатиме темп і глибину проникнення ЦД у галузь.

Першим і найбільш системним завданням є уніфікація архітектур. Сьогодні ринок позбавлений єдиного стандарту інтеграції: кожне підприємство будує власний технологічний острів, що унеможлиблює масштабування та обмін досвідом. Подолання цього бар'єру потребує відкритих інтеграційних платформ на базі стандартів STEP AP242 та Asset Administration Shell (AAS), які забезпечать семантичну сумісність між ЦД різних рівнів — від окремого шпindelного вузла [5] до цілого виробничого цеху.

Другим за значущістю є перехід від пасивного моніторингу до адаптивного керування. Переважна більшість розгорнутих сьогодні ЦД виконує лише функції спостереження, залишаючи рішення за оператором. Принциповий крок уперед — системи, здатні самостійно коригувати режими обробки в реальному часі для компенсації зносу інструменту або теплових деформацій заготовки [4, 5]. Саме ця функціональність матиме найвищу вимірювану економічну цінність і стане головним аргументом на користь інвестицій у ЦД для малих і середніх підприємств.

Третім напрямом є розвиток так званих «зелених» цифрових двійників. Екологічна складова поступово перетворюється з регуляторної вимоги на конкурентну перевагу, особливо в умовах посилення вуглецевого регулювання в Євросоюзі. Точне прогнозування енергоспоживання на рівні окремого технологічного переходу, яке стає можливим завдяки ЦД, здатне суттєво знизити вуглецевий слід виробництва і відкрити доступ до нових ринків збуту [4].

Четвертим пріоритетом є глибока аналітика накопичених виробничих даних. Парадокс сучасних ЦД полягає в тому, що, будучи потужними інструментами реального часу, вони практично не використовують потенціал виробничої «пам'яті» — масиву даних, що акумулюється роками. Інтеграція функцій глибокого аналізу дозволить виявляти системні закономірності, приховані за межами вікна моніторингу, і трансформує ЦД з діагностичного інструменту на стратегічний актив підприємства, здатний підтримувати довгострокові управлінські рішення.

#### **Література:**

1. Sun C., Shi V. G. PhysiNet: A Combination of Physics-based Model and Neural Network Model for Digital Twins. arXiv. 2021 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14447> .
2. Chen C. et al. Integrating large language model and digital twins in the context of industry 5.0: Framework, challenges and opportunities. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2025. Vol. 94. Art. 102982. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.102982> .
3. Dayaratna A. Exploring the Intersection of NVIDIA Omniverse, Digital Twins, and the Industrial Metaverse Through Advanced 3D Modeling Technologies. IDC White Paper. 2023. <https://doi.org/10.5120/ijca2025924000> .
4. Kausar M. A. Digital Twin-Enabled Anomaly Detection for Industrial IoT using Explainable AI. International Journal of Computer Applications. 2025. Vol. 187, No. 37. <https://doi.org/10.5120/ijca2025924000> .
5. Сапон С. П., Дзюба Д. І. Цифрові двійники шпindelних вузлів. Огляд. Вісник ХНТУ. 2023. № 4(87). С. 148–158. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.17> .

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ТВЕРДОМУ ТОЧІННІ ДЕТАЛЕЙ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ НА ОСНОВІ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ**

**Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В.,  
Григоренко Д.М., Гринь А. В.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасне важке машинобудування характеризується широким використанням токарної обробки великогабаритних і відповідальних деталей, зокрема валів, роторів, бандажів, роликів, штоків, посадкових поверхонь та інших елементів, що працюють в умовах високих механічних навантажень і підлягають термічному зміцненню. У багатьох випадках після термообробки такі деталі мають твердість 50...65 HRC, що потребує застосування твердого точіння як альтернативи шліфуванню. Перевагами цього процесу є скорочення технологічного циклу, зменшення допоміжного часу, підвищення продуктивності та можливість виконання чистової обробки за один установ. Однак для важкого металорізального обладнання процес твердого точіння супроводжується значними динамічними навантаженнями, локальними коливаннями в зоні різання, підвищеними контактними температурами та інтенсивним зношуванням ріжучого інструмента, що негативно впливає на якість обробленої поверхні та точність формоутворення. Особливо це проявляється при обробці великогабаритних деталей, де навіть незначні вібраційні відхилення викликають хвилястість поверхні, зростання шорсткості та прискорене руйнування ріжучої кромки. Це обумовлює необхідність розроблення методик оперативного контролю процесу твердого точіння з використанням параметрів віброакустичного сигналу як інформативного діагностичного критерію.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності твердого точіння в умовах важкого машинобудування є застосування віброакустичного моніторингу процесу різання, який дозволяє оперативно оцінювати стан технологічної системи «верстат – інструмент – деталь», стабільність процесу різання, інтенсивність коливань та ступінь зношування ріжучої кромки. Структурно-логічна схема експериментального стенда для дослідження

віброакустичних процесів при твердому точінні на важкому металорізальному обладнанні наведена на рисунку 1. Запропонована схема включає оброблювану деталь, різець з КНБ-пластиною, датчик вібрацій, систему вимірювання та реєстрації сигналу, блок обробки й аналізу віброакустичного сигналу, а також блок інтерпретації результатів і формування технологічних рекомендацій (рис. 1). Такий підхід дозволяє перейти від традиційного контролю результату обробки до контролю самого процесу різання в режимі реального часу.



Рис. 1. Схема експериментального стенда для дослідження віброакустичного сигналу при твердому точінні на важкому обладнанні

Науковий підхід базується на встановленні взаємозв'язку між параметрами віброакустичного сигналу та показниками якості обробленої поверхні. У процесі дослідження виконується реєстрація часових сигналів коливань, спектральний аналіз, визначення середньоквадратичних значень амплітуди, пікових навантажень, домінуючих частот і енергетичних характеристик сигналу. Отримані параметри використовуються для оцінки стабільності процесу різання, стану ріжучого інструмента, впливу режимів різання на динамічну поведінку

технологічної системи та прогнозування якості обробленої поверхні. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні віброакустичного сигналу як інтегрального діагностичного параметра для оперативного прогнозування якості поверхні при твердому точінні великогабаритних деталей на важкому металорізальному обладнанні. На відміну від традиційних методів контролю, які оцінюють шорсткість після завершення обробки, запропонований підхід дозволяє здійснювати непрямий контроль якості безпосередньо в процесі різання.

Особливе значення така методика має для важкого машинобудування, де при обробці великогабаритних загартованих деталей велика маса обладнання не усуває локальні коливання в зоні контакту ріжучої кромки з деталлю. Навпаки, складна динамічна структура важких верстатів, нерівномірність припуску, коливання жорсткості заготовки та високі сили різання призводять до появи вібрацій, які безпосередньо впливають на якість поверхні та ресурс КНБ-пластин. Використання віброакустичного моніторингу дозволяє своєчасно виявляти нестабільність процесу, оптимізувати режими різання, оцінювати демпфувальні властивості інструментальної системи та попереджати розвиток небажаних коливальних режимів. Запропоновано принцип використання спектральних параметрів віброакустичного сигналу для оцінки демпфувальних властивостей вузла кріплення ріжучої пластини і прогнозування стійкості інструмента в умовах твердого точіння. Це створює можливість підвищення технологічної ефективності процесу ще на стадії вибору конструктивних і режимних параметрів обробки.

Практична значущість запропонованого підходу полягає у створенні науково-методичної основи для оперативного контролю і оптимізації процесу твердого точіння деталей важкого машинобудування, що дозволяє підвищити якість обробленої поверхні, збільшити стійкість ріжучого інструмента, скоротити допоміжний час у порівнянні зі шліфуванням і забезпечити стабільність технологічного процесу. Для важких токарних верстатів це створює передумови для розширення застосування твердого точіння при чистовій обробці великогабаритних загартованих деталей.

# МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

<sup>1</sup>Ковальов В.Д., <sup>2</sup>Кіоран Ю.В.

(<sup>1</sup>ДДМА, м. Краматорськ, Україна, <sup>2</sup>м. Бая-Маре, Румунія)

Сучасні підприємства важкого машинобудування функціонують в умовах постійного зростання обсягів техніко-технологічної інформації, що накопичується в процесі проектування, виробництва, експлуатації, ремонту та модернізації складного обладнання. До таких даних належать технічна документація, креслення, технологічні маршрути, характеристики деталей, параметри верстатів, режими оброблення, архіви ремонтів, виробничі звіти, нормативно-довідкова інформація, журнали відмов, паспорти обладнання, каталоги інструменту та інші текстові й табличні масиви даних. Значна частина цієї інформації існує у неструктурованому вигляді, розподілена між різними підрозділами підприємства і не використовується як єдиний інформаційний ресурс для підтримки інженерних та управлінських рішень. У роботі показано, що створення бази знань про деталі, верстати, технологічні операції та умови оброблення є важливою основою підвищення ефективності важкого металорізального обладнання та прийняття раціональних технічних рішень.

Для сучасного етапу розвитку важкого машинобудування актуальним є перехід від традиційних баз даних до інтелектуальних баз знань, здатних не лише накопичувати інформацію, а й автоматично аналізувати її, виявляти приховані закономірності, формувати прогнози та підтримувати прийняття рішень. Особливе значення при цьому має використання методів штучного інтелекту, машинного навчання та прикладної лінгвістики, які дозволяють обробляти великі масиви структурованих і неструктурованих технічних даних. Структурно-логічна схема формування інтелектуальної бази знань підприємств важкого машинобудування наведена на рисунку 1. Вона включає джерела даних підприємства, блок лінгвістичного та семантичного аналізу інформації, формування бази знань, AI-аналітику та систему підтримки інженерних і управлінських рішень. Особливістю запропонованого підходу є використання методів прикладної лінгвістики (Natural Language Processing, NLP) для автоматизованого оброблення технічних текстів, які традиційно не включаються до класичних баз даних. Це дозволяє автоматично виконувати розпізнавання тексту, нормалізацію технічної термінології, вилучення сутностей (назви деталей, обладнання, технологічних операцій, дефектів, параметрів, режимів різання), встановлення семантичних зв'язків між ними та формування структурованого представлення знань.

Таким чином формується інженерний граф знань, у якому пов'язуються об'єкти типу: підприємство – деталь – верстат – операція – інструмент – режим – якість – дефект – ремонт – ресурс. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні методів прикладної лінгвістики та штучного інтелекту для автоматизованого вилучення, структуризації та інтеграції технічних знань про підприємства важкого машинобудування з великих масивів неструктурованих даних.

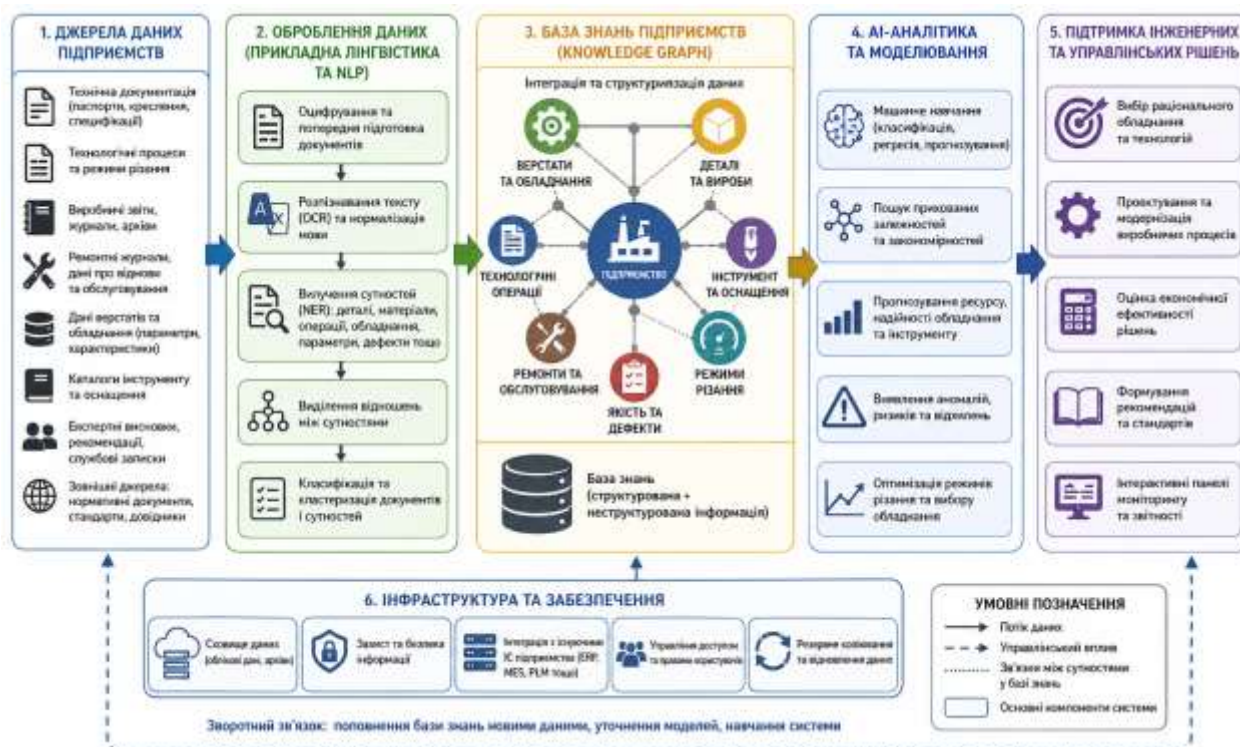


Рис. 1. Структурно-логічна схема формування інтелектуальної бази знань підприємств важкого машинобудування

Використання AI-аналітики на основі сформованої бази знань дозволяє вирішувати широкий спектр прикладних задач: класифікацію деталей і технологічних процесів, прогнозування ресурсу обладнання, виявлення прихованих залежностей між конструктивними параметрами і показниками якості, аналіз причин відмов, оптимізацію режимів оброблення, вибір раціонального обладнання та формування рекомендацій щодо модернізації виробництва. Підґрунтям для такого підходу є створення інформаційних моделей деталей, класифікація ознак, статистичний аналіз і методики підтримки вибору раціональних технічних рішень. На відміну від класичних інформаційних систем, інтелектуальна база знань дозволяє не лише зберігати інформацію, а й формувати нові знання на основі аналізу великих масивів виробничих даних. Науково новим є використання AI-моделей для виявлення закономірностей між технічними характеристиками обладнання, параметрами технологічних процесів і результатами експлуатації на підприємствах важкого машинобудування.

Практична значущість запропонованого підходу полягає у створенні цифрової інженерної платформи, яка забезпечує оперативний доступ до накопичених знань, підтримку технічного проектування, вибір обладнання, аналіз виробничих ризиків, прогнозування відмов, оптимізацію технологічних процесів і формування рекомендацій для управлінських рішень. Для підприємств важкого машинобудування це створює основу для переходу до концепції інтелектуального виробництва.

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РЕМОНТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВАЖКИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

**Ковальов В.Д., Лобур Ю.М., Чуйко В.В., Міхєєв А.О., Підгорний М. І.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Сучасне важке машинобудування значною мірою базується на використанні важких металорізальних верстатів, які забезпечують обробку великогабаритних і відповідальних деталей енергетичного, металургійного, транспортного та гірничого обладнання. Значна частина такого устаткування характеризується тривалими термінами експлуатації, високим ступенем фізичного зносу та накопиченням похибок, пов'язаних із деформацією несучої системи, зношуванням напрямних, втратою жорсткості вузлів, розвитком теплових деформацій і погіршенням динамічної стійкості. За цих умов традиційний ремонт, що виконується за регламентним принципом або на основі локальної дефектації окремих вузлів, не завжди забезпечує відновлення техніко-експлуатаційних показників обладнання. Тому для важкого машинобудування актуальним є застосування комплексних методик оцінки технічного стану, які дозволяють на основі системного аналізу приймати науково обґрунтовані ремонтні рішення з урахуванням взаємного впливу точності, жорсткості, теплостійкості, вібростійкості, продуктивності, надійності та економічної доцільності ремонту. У роботі показано, що саме комплексна оцінка технічного стану за системою критеріїв якості дозволяє обґрунтувати вибір раціональної стратегії відновлення або модернізації важкого верстата.

Запропонована методика оцінки технічного стану та обґрунтування ремонтних рішень для важких металорізальних верстатів базується на структурно-логічному підході, який поєднує етапи збору вихідних даних, оцінки технічного стану, ідентифікації дефектів, формування альтернативних ремонтно-відновлювальних рішень, розрахунку прогнозованих параметрів після ремонту та багатокритеріального вибору раціонального варіанта. Структурно-логічна схема методики наведена на рисунку 1. Особливістю підходу є

використання системи взаємопов'язаних критеріїв, що дозволяє оцінювати верстат не за окремим дефектом, а як єдину технологічну систему, у якій погіршення одного показника впливає на загальну ефективність обладнання.

Методика передбачає, що на першому етапі формується завдання на ремонт або модернізацію, збираються дані про технічний стан обладнання, результати вимірювань, дані дефектації вузлів, характеристики точності обробки, показники жорсткості, вібраційного та теплового стану верстата. На основі цього здійснюється оцінка технічного стану та ідентифікація ресурсних обмежень, після чого формується множина альтернативних ремонтних рішень, наприклад: відновлення напрямних, заміна шпindelного вузла, компенсація деформацій, модернізація систем приводу або підсилення несучої системи. Для кожного варіанта виконується прогноз параметрів верстата після реалізації ремонтного рішення з подальшою оцінкою показників якості (рис. 1).

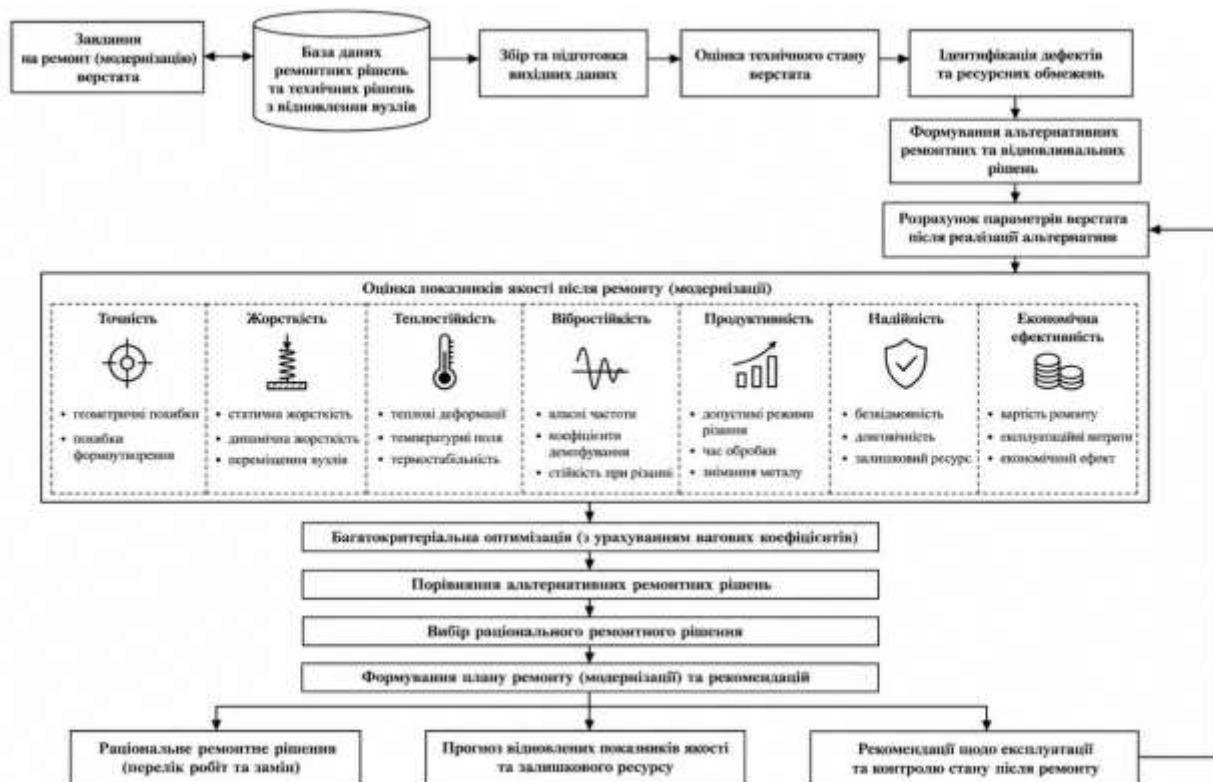


Рис. 1. Структурно-логічна схема методики оцінки технічного стану та обґрунтування ремонтних рішень важких металорізальних верстатів

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні багатокритеріального підходу до обґрунтування ремонтних рішень, який, на відміну від традиційної локальної дефектації, дозволяє оцінювати ефективність ремонту за сукупністю взаємопов'язаних технічних і економічних критеріїв.

Ключовим елементом методики є блок оцінки показників якості після ремонту, який включає аналіз точності, статичної та динамічної жорсткості, теплостійкості, вібростійкості, продуктивності, надійності та економічної ефективності. Для важких металорізальних верстатів саме ці критерії є визначальними, оскільки великі маси рухомих вузлів, значні силові навантаження та тривалі цикли обробки суттєво підвищують чутливість обладнання до пружних, теплових і динамічних деформацій. Використання вагових коефіцієнтів у системі багатокритеріальної оптимізації дозволяє враховувати специфіку конкретного обладнання та пріоритетність окремих критеріїв залежно від умов експлуатації. Новим є запропонований принцип інтегрованої оцінки технічного стану після ремонту, який забезпечує прогноз не лише відновлення працездатності окремих вузлів, а й залишкового ресурсу та рівня технологічної ефективності верстата як цілісної системи.

Практичне застосування методики дає змогу формувати раціональний план ремонту або модернізації важких токарних, карусельних, розточувальних та інших великогабаритних верстатів, зменшувати обсяг необґрунтованих ремонтних робіт, прогнозувати відновлені показники якості, оцінювати залишковий ресурс обладнання та знижувати експлуатаційні витрати. Для підприємств важкого машинобудування це створює науково-методичну основу для переходу від регламентного ремонту до обґрунтованого ремонтно-відновлювального управління технічним станом обладнання. Запропонована методика дозволяє формувати раціональні ремонтні рішення за комплексом взаємопов'язаних критеріїв якості, що забезпечує підвищення технічної ефективності, надійності та ресурсу важких металорізальних верстатів.

# ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ КОМАНДАМИ

**Кондратенко О.О., Кондратенко К.В.**

*(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)*

Як і для багатьох бізнес-процесів, рисою сучасного етапу розвитку HR є цифровізація. Сьогодні це єдина основа, яка дозволяє HR-департаментам в Україні взагалі функціонувати, утримувати людей та швидко реагувати на зміни. Коли команда розкидана по різних країнах, а процеси мають бути гнучкими як ніколи, цифрові інструменти стають тим самим клеєм, що тримає бізнес до купи.

Метою дослідження є аналіз практичних аспектів та інструментів цифровізації (зокрема PLM-систем та технологій Deskless Tech) для забезпечення ефективного управління крос-функціональними командами та лінійним персоналом в умовах воєнних дій та розвитку внутрішньогалузевої кооперації в Україні.

Процес цифровізації управління групами не був однорідним. Кожна галузь мала свій стартовий майданчик та специфічні інструменти. IT та сфера професійних послуг постраждали найменше, оскільки інфраструктура була готовою. Проте відбулося масштабування інструментів від локального використання до загальнокорпоративного стандарту. Якщо раніше методології Agile/Scrum та дошки Jira чи Trello були інструментами суто розробників, то з 2020 року на них перейшли відділи маркетингу, HR, фінансів та продажів. Управління командами стало повністю прозорим: кожен бачить «спринти» та завантаженість колег у реальному часі.

Більше викликів постає перед важкою промисловістю. Так, у контексті глобалізації та підвищення конкурентного тиску на світових ринках, важкого стану машинобудівної галузі України в умовах воєнних дій особливу актуальність набувають питання розвитку виробничого аутсорсингу та внутрішньогалузевої кооперації [1].

У машинобудуванні команда — це не лише офісні працівники, а й інженери, технологи та проєктні групи, що часто розкидані між різними підприємствами. Постає питання: Як змусити працівників різних компаній (замовника та аутсорсера) працювати як єдиний механізм? Відповідь полягає у створенні цифрового середовища, де інженери обох сторін у реальному часі бачать зміни у кресленнях. Реалізація цього рішення досягається за рахунок використання спільних PLM-систем.

PLM-системи (Product Lifecycle Management — Управління життєвим циклом виробу) є вершиною інженерної та виробничої діджиталізації.

Якщо в HR ми говоримо про управління життєвим циклом співробітника, то PLM керує життєвим циклом продукту — від виникнення першої ідеї та створення 3D-моделі до виробництва, сервісного обслуговування та утилізації.

Для сучасних підприємств (особливо в машинобудуванні, високотехнологічному виробництві, авіакосмічній та оборонній галузях) PLM-система є тим самим цифровим фундаментом, який кардинально змінює роботу

крос-функціональних команд.

Проте автоматизація лише офісу створює небезпечний цифровий розрив на підприємстві. Справжня ефективність бізнесу досягається тоді, коли цифровий інструментарій доходить до «синіх комірців» — лінійного персоналу, водіїв, логістів, будівельників та виробничих робітників.

Для цієї категорії працівників класичні системи типу Slack, Jira чи важкі HRIS-платформи не підходять. Робочі на виробництві чи в полі не мають постійного доступу до комп'ютера, їхні руки часто зайняті, а специфіка завдань вимагає максимальної простоти та швидкості. Тому сьогодні активно розвивається окремий клас інструментів — Deskless Tech (технології для працівників без робочого столу) [2]. Усі інструменти для «синіх комірців» адаптовані під мобільні пристрої (смартфони, планшети) або спеціалізовані термінали (табл.1).

Таблиця 1 - Головні цифрові інструменти для лінійного персоналу

Клас інструментів	Призначення	Практичний приклад
Мобільні HR-аплети (WFM — WorkForce Management)	Оцифровують графіки змін, облік відпрацьованого часу, перегляд нарахування зарплати та замовлення довідок.	Shifts (у MS Teams), Quinyx, Deputy, сервіси самообслуговування в HURMA/PeopleForce
Цифрові чек-листи та мобільне Task-управління	Замінюють паперові журнали огляду обладнання, інструкції з безпеки та звіти про виконану роботу.	MaintainX, Lumiform, нотифікації в ERP
Корпоративні мікро-платформи комунікації	Спеціальні месенджери, де немає флуду, але є швидкі сповіщення від керівництва, опитування та база знань.	Beekeeper, Yoobic, Workplace
Платформи мобільного навчання (Microlearning)	Короткі (до 3–5 хвилин) відеоінструкції, тести з техніки безпеки чи огляду нового обладнання, які можна пройти зі смартфона.	AcademyOcean (мобільна версія), EdApp, Skilljar

Цифровізація «синіх комірців» в сучасній Україні - це також питання безпеки. Мобільні додатки дозволяють миттєво оповістити весь персонал заводу чи логістичного центру про повітряну тривогу, скоординувати перехід в укриття та зафіксувати через цифрову перекличку, що всі співробітники перебувають у безпеці. Також завдяки єдиному цифровому HR-простору навіть віддалені учасники аутсорсингових проєктів ідентифікують себе з брендом головного підприємства.

**Література:** 1. Лісовий С.В. Підвищення конкурентоспроможності машинобудівної галузі шляхом розвитку виробничого аутсорингу та внутрішньогалузевої кооперації. / С.В.Лісовий, В.О.Шашко, О.О.Кондратенко // Науково-практичний журнал «Причорноморські економічні студії». – 2025, № 91. – С.170-173. 2. Грішнова О. А. Трансформація зайнятості та управління персоналом в умовах цифровізації: виклики для лінійного та виробничого персоналу / О. А. Грішнова, В. О. Шпильова // Демографія та соціальна економіка. – 2022, № 2 (48). – С. 89–104.

# ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТУ ПРОСТРІЛ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО РАДІАЛЬНО-ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

Косарєв В.С., Музикін П.С., Садовський Є.В.  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Виготовлення порожнистих деталей з фланцем в процесах холодного об'ємного штампування широко розповсюджено в сучасному машинобудуванні. Але для виготовлення якісних виробів треба дотримуватись певних умов деформування [1, 2].

Метою дослідження є виявлення умов, за яких може виникати на внутрішній поверхні порожнистого виробу дефект типу простріл. Визначення закономірностей формування прострілу дозволяє не лише покращити точність геометричних параметрів кінцевої деталі, але й забезпечити більш надійний контроль за якістю продукції у процесі об'ємного штампування. Отримані результати є основою для подальшої оптимізації параметрів процесу деформування.

Для моделювання утворення дефекту типу простріл в процесі комбінованого радіально-зворотного видавлювання п'яти порожнистих деталей типу стакан з фланцем, розташованого біля дна, у програмі DEFORM 2D/3D було використано циліндричну заготовку з матеріалу AL 1100 Cold (99% вміст алюмінію) [3] радіусом  $R = 18$  мм та висотою 36 мм (рис. 1). Іншими незмінними параметрами були: робочий хід пуансону 24 мм зі швидкістю  $V_0 = 1$  мм/с, товщина дна стакану 12 мм, товщина стінки стакану 5,4 мм, у всіх інструментів радіус округлення 3 мм, коефіцієнт тертя між поверхнями інструментів та заготовки за Зібелем  $\mu = 0,08$ , матеріали інструментів. Змінювалась лише відносна товщина фланцю  $\bar{h}_\phi$  ( $\bar{h}_\phi = \frac{h_\phi}{R}$ ) від 0,1 до 0,5 (скріншот для  $\bar{h}_\phi = 0,1$  на рис. 1 не представлений).

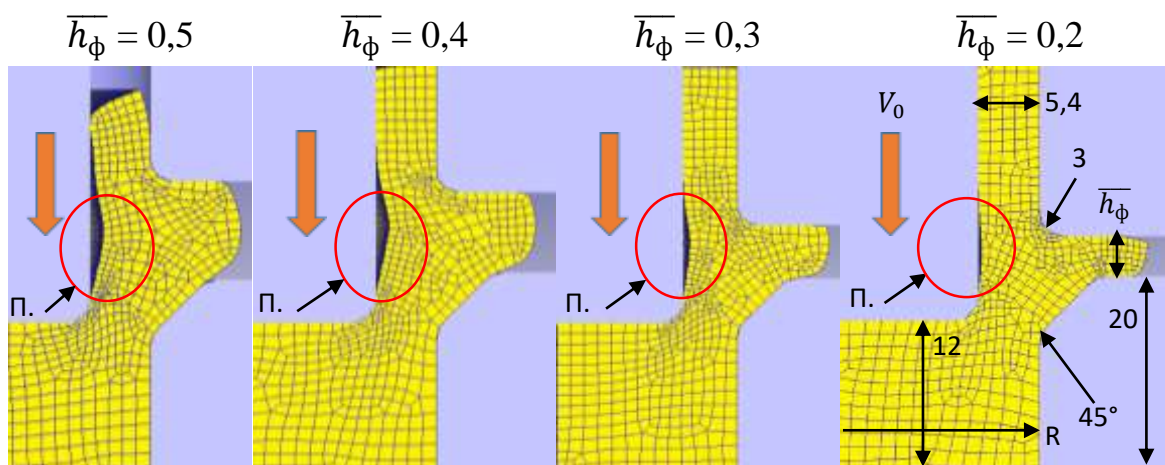


Рис. 1. Викривлення діляльної сітки та зони утворення дефекту (П – прострілу)

Досліджувалась залежність появи дефекту типу простріл від відносної

товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  та ходу пуансона  $S$  (рис. 2). Було встановлено, що зі збільшенням величини відносної товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  від 0,1 до 0,5 зменшується величина ходу пуансона  $S$ , починаючи з якої виникає такий дефект як простріл. Тобто ця межа появи дефекту типу простріл для різних значень відносної товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  не є постійною. Якщо хід пуансону перевищує цю межу, то дефект типу простріл утворюється, якщо ні – не утворюється.

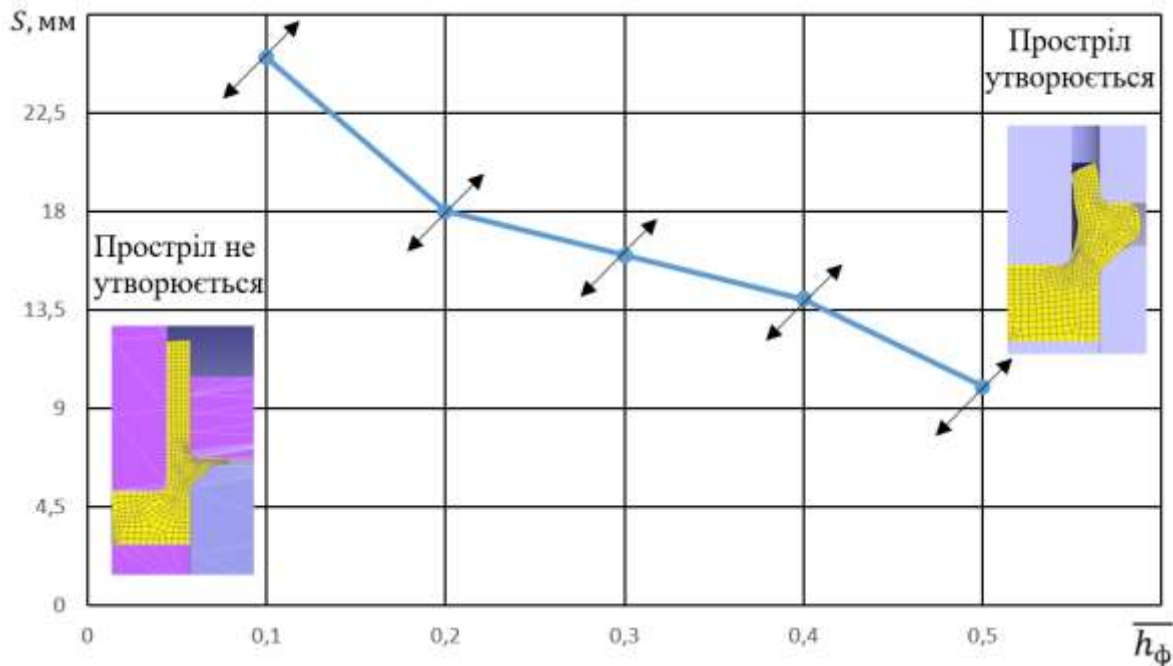


Рис. 2. Межа (графік), яка демонструє можливість утворення дефекту типу простріл в залежності від ходу пуансона  $S$  та відносної товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$

Підсумком роботи є те, що для відносних значень товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  від 0,1 до 0,5 при різних значеннях ходу пуансона  $S$  для матеріалу AL 1100 Cold встановлена межа, відносно якої утворюється або ні на внутрішній поверхні стакану в зоні фланцю такий дефект як простріл. Зі збільшенням величини відносної товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  зменшується величина ходу пуансона  $S$ , починаючи з якої виникає такий дефект як простріл. Це можна пояснити тим, що зі збільшенням величини відносної товщини фланцю  $\overline{h}_\phi$  збільшуються і висотні розміри дефекту типу простріл. Отримані результати дозволять в подальшому зробити оптимізацію параметрів процесу деформування.

**Література:** 1. Алієв І.С., Грудкіна Н.С., Малій Х.В., Таган Л.В. /Моделювання та розробка процесів точного об'ємного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ: ДДМА. 2021. 208 с. ISBN 978-617-7889-08-2. 2. Косарев В. С., Чучин О. В. / Дослідження виготовлення порожнистих деталей з фланцем в процесі комбінованого видавлювання/ Збірник «ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ» – Краматорськ: ДДМА, 2025. – №1 (54). – С. 15-20. DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)15. 3. ASM International Handbook Committee, 2001, Metals Handbook Vol 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Materials Park, OH.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ РІЗАННЯ ПРИ ДОВБАННІ ВНУТРІШНІ ГВИНТОВИХ КАНАВОК У ЛЕГОВАНІЙ ГАРТОВАНІЙ СТАЛІ

**Крупа В.В., Штогрин С.П., Салійчук В.С.**  
(ТНТУ імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна)

Аналіз літературних джерел щодо виготовлення гвинтових канавок у отворах показує, що по суті є два основні методи: протягування та довбання. Процес протягування використовується лише для отворів відносно невеликої довжини. Що стосується процесу довбання, то є роботи, в яких загальні математичні моделі для проектування довбального різця з високою точністю та мінімізацією похибок [1], проведені дослідження силових характеристик процесу [2]. Робота [3] присвячена розробці симуляційної моделі процесу довбання як внутрішніх шліцевих так і шпонкових канавок. В ній враховується кінематика, контакту різця із заготовкою та сили різання для прогнозування й оптимізації процесу. Встановлено, що основна кількість робіт мають теоретичний, а не експериментальний характер.

Проведено експериментальні дослідження нарізання внутрішніх гвинтових канавок у заготовках діаметром 40 мм, довжиною 200 мм з матеріалу – сталь 38ХН2МФА. Процес різання здійснюється шляхом надання зворотньо-поступального руху інструменту, що знаходиться в револьверній головці верстата та узгодженого руху заготовки. Заготовка повертається на певний кут в залежності від переміщення інструменту. Таким чином забезпечується точність кута підйому паза. Виконання обробки здійснюється на основі керуючої програми. Схема подана на рис. 1.

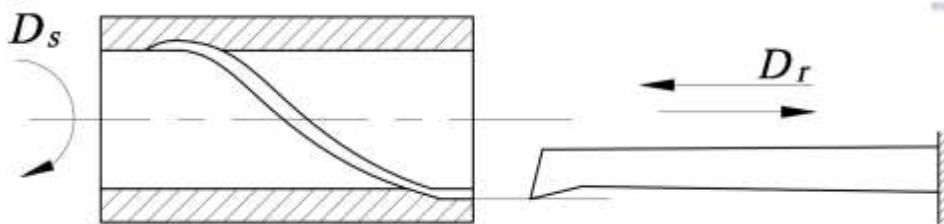


Рис. 1. Схема формування гвинтових пазів втулок довбальними різцями

Обробку кожної канавки проводили при одній і тій самій швидкості різання з наступними глибинами різання:  $t_1 = 0.1$  мм;  $t_2 = 0.2$  мм;  $t_3 = 0.3$  мм;  $t_4 = 0.4$  мм;  $t_5 = 0.5$  мм;  $t_6 = 0.03$  мм. Різні канавки обробляли з різними швидкостями різання:

$$V_1 = 0.75 \frac{\text{м}}{\text{хв}}; V_2 = 1 \frac{\text{м}}{\text{хв}}; V_3 = 2 \frac{\text{м}}{\text{хв}}; V_4 = 3 \frac{\text{м}}{\text{хв}}; V_5 = 6 \frac{\text{м}}{\text{хв}}; V_6 = 8 \frac{\text{м}}{\text{хв}}.$$

Порядок глибин різання змінювали для кожної канавки.

Крім того на початку обробки зроблений початковий прохід з глибиною 0,1мм, що призначений для попередньої зачистки поверхні, щоб знівелювати зміну розміру отвору по довжині (в межах допуску).

В процесі різання записували значення відсоткового завантаження серводвигунів верстата по потужності, записавши процес цієї зміни на стійці ЧПК на відео. Далі робили розкадрування відео і записували значення відсоткового значення завантаження двигунів по потужності  $\varepsilon$ . Після цього віднімали від отриманого відсоткового навантаження початкове навантаження на приводи (внаслідок попереднього натягу (як по осі Z), або навантаження від маси револьверної головки, яка розміщена на напрямних під кутом. Отримували значення миттєве значення навантаження на відповідний двигун,  $\tau$  %

$$\tau_{xz} = \varepsilon_{xz} - \mu_{xz}$$

Потужність двигуна по осі Z відповідає головній складовій силі різання  $P_z$ . Двигун по осі X утримує інструмент від провороту і фактично відповідає за силу  $P_x$ . Величина початкового навантаження по осях  $\mu_z = 5\%$ ;  $\mu_x = 25\%$ .

Реальна потужність, що затрачається на різання визначиться з залежності, що враховує коефіцієнт корисної дії передачі гвинт-гайка кочення:

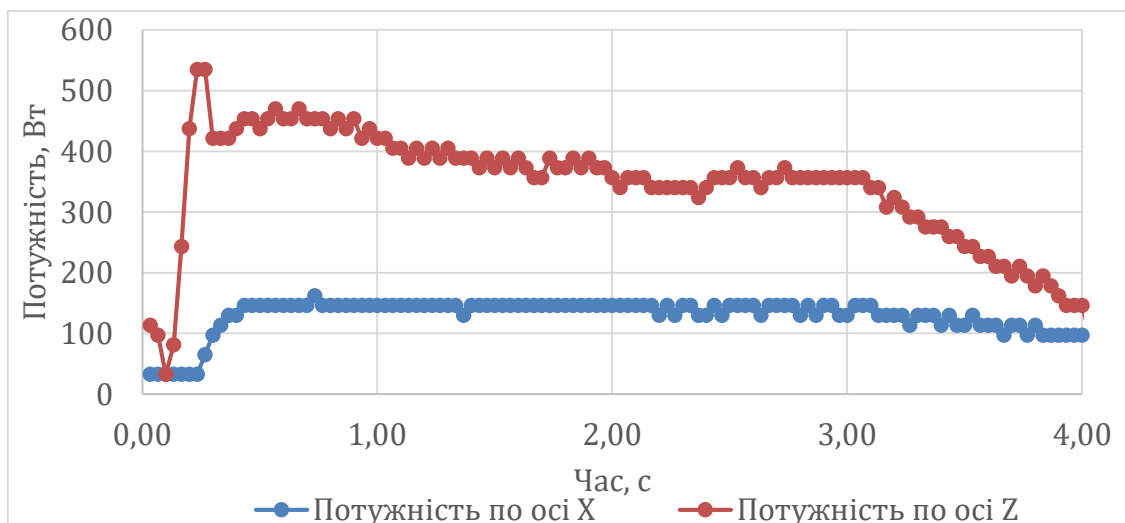
$$N_{\text{різ}} = N \frac{\tau}{100} \cdot \eta$$

де  $N = 1,8\text{кВт}$  – потужність серводвигуна приводу подач ;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу  $\eta = 0,9$ ;

$\tau$  – миттєве значення навантаження на відповідний двигун, %.

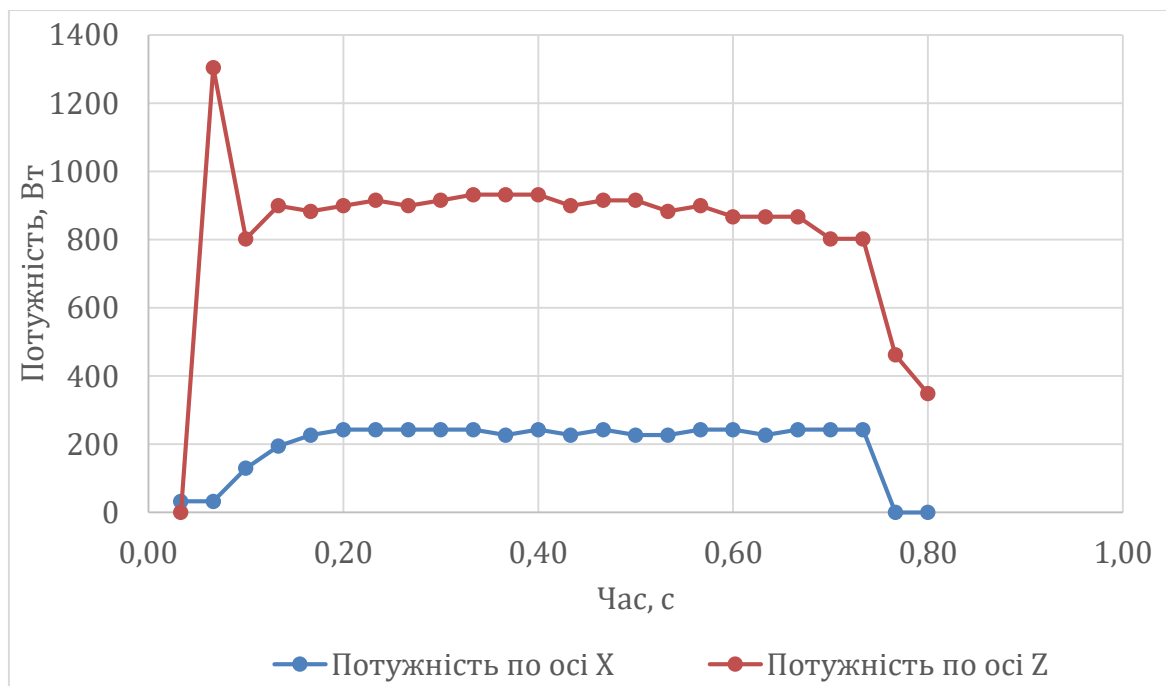
Приклади зміни потужності різання по осях в часі подані на рис. (а-в) для глибини різання  $t=0.2$  мм при швидкостях різання 750, 2000 та 6000 мм/хв.



а)



б)



в)

Рис.2. Потужність різання по осях при глибині різання  $t_1=0.2\text{мм}$  на швидкостях  $V=0.75\text{м/хв}$  (а),  $2\text{ м/хв}$  (б) і  $6\text{ м/хв}$  (в)

Апроксимовано результати та отримано залежності зміни потужності різання від глибини різання та швидкості різання.

На основні отриманих даних можна визначити силові характеристики процесу, що дозволить мати вихідні дані для проектування державки інструменту.

#### Література:

1. Lin C.-L., Han C.-N., Chen T.-H. Mathematical models for manufacturing a novel gear shaper cutter. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010. Vol. 24, № 3. P. 851–859. DOI: 10.1007/s12206-009-1022-z.
2. Huang Q., Wei Z. Profile analysis of spur gear shaping cutters based on sharpened cutting edges. *Machines*. 2022. Vol. 10, № 6. Article 484. DOI: 10.3390/machines10060484.
3. Tsay C.-B., Liu H.-H., Chen Y.-C. Spur gear generation by shaper cutters. *Mechanism and Machine Theory*. 2000. Vol. 35, № 1. P. 67–82. DOI: 10.1016/S0094-114X(99)00005-2.

## КЕРАМІЧНІ КУЛЬКИ ТРИБОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ: ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ОБРОБКИ – СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ

**Лавріненко В.І.**

*(Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ,  
Україна)*

Керамічні матеріали посідають чільне місце у сучасному машинобудуванні. Серед них нині значна увага приділяється нітриду кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), що підтверджується сучасними публікаціями. Його виняткові властивості привели до широкого застосування у аерокосмічній промисловості, електромобілях, прецизійних верстатах. Так, традиційні сталеві підшипники, що застосовуються у авіаційних двигунах, часто піддаються сильному зносу і руйнуванню від адгезії в екстремальних умовах, таких як високі температури, швидкості і навантаження та недостатнє змащування. Навпаки, керамічні підшипники з  $\text{Si}_3\text{N}_4$  демонструють чудові характеристики в цих складних умовах. Враховуючи ці переваги, провідний світовий виробник підшипників, група SKF, визначила розробку високоякісних кулькових керамічних підшипників з  $\text{Si}_3\text{N}_4$  у якості стратегічного пріоритету [1]. Вкажемо, що нині і в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України провадяться розробки з отримання керамічних кульок для підшипників, в тому числі і з нітридної кераміки [2].

Види відмов керамічних і гібридних кулькопідшипників при нормальній і недостатній змазці в першу чергу пояснюються двома основними механізмами: і) внутрішніми дефектами спікання, що потенційно призводять до утворення поверхневих тріщин, і ii) трибологічно викликаними дефектами, пов'язаними з втомним викришуванням, зносом та заїданням. Трибологічна податливість різних марок сталі, композитів з металічною матрицею, кульок з нітриду кремнію з різною зернистістю і обробкою поверхні, а також кульок з сталі AISI 52100, була досліджена [3] в ході випробувань на зворотно-поступальне ковзання. Адгезійний знос був домінуючим механізмом зносу як для контакту кераміка/кераміка, так и для контакту кераміка/сталь. Неполірований нітрид кремнію з манометровим зерном кераміки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  по відношенню до кульок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  з нанометровим зерном показали чудову пристосовність і менший знос у порівнянні з полірованими. Серед різних досліджених комбінацій саме неполірована кулька  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в парі з композитом с металічною матрицею продемонструвала найнижчий коефіцієнт тертя і мінімальний знос. Це пояснюється наявністю фази TiC в матриці, яка, ймовірно, знижає адгезійну взаємодію між матрицею і  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а також сприяє підвищенню твердості контрматеріалу. При доданні твердої змазки  $\text{WSe}_2$  спостерігалось утворення трибоплівки на поверхні ковзання.

Притаманна кераміці з нітриду кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) крихкість обмежує її практичне застосування. В роботі [4] розроблені керамічні композити  $\text{Si}_3\text{N}_4$  за допомогою комбінованої стратегії сублімаційної сушки і гарячого пресування,

включивши як армуючі агенти частинки нанонітриду титана (нано-TiN) і направлено вирівняні нитковидні кристали карбіду кремнію (SiCw) (рис. 1). Ці армуючі елементи були рівномірно розподілені в керамічній матриці, що привело до помітного поліпшення як механічних властивостей, так і мікроструктурної цілісності. Так, композит, що містив 5 % за масою нано-TiN і 9 % за масою SiCw, продемонстрував найбільш оптимізовані характеристики: міцність під час згинання збільшилася на 45 %, а в'язкість руйнування підвищилася на 69 % у порівнянні з неармованою керамікою  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Крім того, впровадження цих армуючих елементів значно підвищило зносостійкість кераміки.

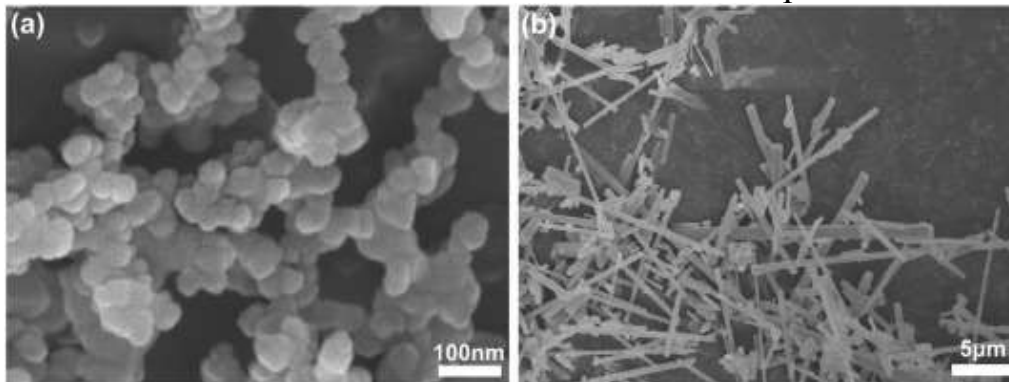


Рис. 1. Мікрофотографії СЕМ нано-TiN (a) і SiCw (b) [4].

Низький рівень пошкоджень поверхні керамічних роликів з нітриду кремнію є важливим для досягнення збільшеного терміна служби підшипників за екстремальних умов. В роботі [5] розроблений новий метод хіміко-механічної поліровки (ХМП) роликів підшипників з нітриду кремнію із застосуванням алмазної стрічки і розчину NaOH. Хімічна реакція між  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і NaOH була продемонстрована за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS). Для поглибленого розуміння процесу видалення матеріалу і формування топографії поверхні була розроблена математична модель шорсткості поверхні, яка об'єднує дані багатомасштабного контакту, дані наноіндентування, а також розподіл зерен і кінематику. Теоретичні і експериментальні результати по шорсткості поверхні добре узгоджуються з похибкою менше 15,28 %. В результаті циліндрична шорсткість поверхні зменшилася з початкового значення  $Sa$  64,514 нм до кінцевого значення  $Sa$  5,113 нм при швидкості видалення матеріалу до 0,022 мкм/хв. протягом 30 хвилин поліровки при  $\text{pH}=12$  і розмірі абразиву 0,5 мкм.

Під час хіміко-механічного полірування (ХМП) суспензія повинна мати високу селективність до діелектриків  $\text{SiO}_2$  по відношенню до  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і високу швидкість видалення матеріалу (MRR)  $\text{SiO}_2$ . Абразиви  $\text{CeO}_2$  широко застосовуються в цьому процесі з-за їх кращої селективності по відношенню до  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . В статті [6] визначено, що найкращий ефект полірування був досягнутий, коли суспензія  $\text{CeO}_2$  мала  $\text{pH}5$  і містила 0,02М лізину (Lys), 0,02 М глютамінової кислоти (Glu) і 0,003М гідроксиду тетраетиламонію (TEAOH). В цей час MRR  $\text{SiO}_2$  складав 3606,1 Å/хв, а  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 101,6 Å/хв, що забезпечує високу селективність – 35,49. Значення середньоквадратичної шорсткості (Sq) полірованих  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$  склали 0,062 нм і 0,046 нм відповідно.

Для досягнення ефективної і високоточної обробки мініатюрних кульок в дослідженні [7] пропонується новий диск з переривчастими секторами фіксованих абразивів (PDSFA) (рис. 2). Змінюючи коефіцієнти тертя в різних секторах диску, метод сприяє формуванню рівномірних траєкторій притирки з повним покриттям поверхні кульки, підвищуючи точність і ефективність обробки. Була створена експериментальна платформа для оцінки характеристик метода PDSFA з використанням мініатюрних кульок з підшипникової сталі GGr15. При оптимальному ексцентриситеті канавки 0,3 після 6 годин притирки кульки досягають середньої круглості ( $RON_t$ ) 0,118 мкм і шорсткості поверхні ( $R_a$ ) 17,5 нм. Наступний тригодинний процес поліровки додатково знижає  $RON_t$  до 0,082 мкм ( $\pm 0,02$  мкм), а  $R_a$  – до 9 нм ( $\pm 0,8$  нм).

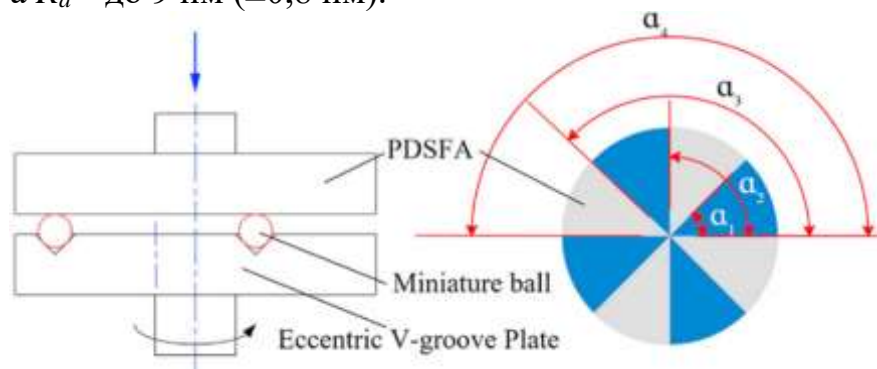


Рис. 2 Абразивний диск з переривчастими секторами (PDSFA) [7].

Разом з тим, нітрид кремнію у вигляді керамічних кульок є також чудовим тестовим трибологічним матеріалом, особливо для високотвердих матеріалів, насамперед алмазних, на що останнім часом дослідники звертають підвищену увагу.

**Література.** 1. Fei Chen, Xiaobo Sun, Bin Fang, Ke Yan, Jun Hong, Bei Yan. Tribological behavior and electrical insulation properties of micro-and nanoscale graphene/ $\beta$ - $Si_3N_4$  whisker-reinforced  $Si_3N_4$  ceramics at low temperature. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 36, May–June 2025, Pages 1813-1821. 2. Сохань С.В., Возний В.В., Сороченко В.Г. Алмазне шліфування керамічних куль з базуванням у канавці й круговою подачею з коливанням. *Надтверді матеріали*. № 4. 2025. С. 76–91. 3. A preliminary study on the tribological compliance of ball and race materials for application in unlubricated hybrid bearings / K. Grinkevych, O. Zgalat-Lozynskyi, N. Konih-Ettel, S. Dudka, I. Kud, S. Kyryliuk, E. Muñoz-Cortés, R. Nevshupa. *Tribology International*. Volume 212, December 2025, 110913. 4. Tailoring mechanical and tribological properties of  $Si_3N_4$  ceramics by synergistic strengthening from nano-TiN and aligned SiCw / Qiang Zhang, Weili Wang, Wenxue Shi, Dakuan Li, Feng Sun, Zaiyi Wang, Weibin Zhang. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 38, September–October 2025, Pages 6260-6274. 5. Modeling of surface roughness for chemical mechanical polishing of ceramic bearing rollers made of silicon nitride using a diamond film belt / Zhan Chen, Weifeng Yao, Ruiwen Tang, Mehdi Gheisari, Tianqi Zhang, Jinzhong Wu, Jinling Cong, Yuan Song, Binghai Lyu. *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 157, 17 January 2026, Pages 287-302. 6. Improvement of polishing performance of  $SiO_2/Si_3N_4$  by surfactants in  $CeO_2$  based slurry / Xinyu Zhao, Xinyu Han, Fangyuan Wang, Baimei Tan, Yunhui Shi, Jiadong Zhao, Wenyue Qi, Jiaji Geng. *Applied Surface Science*. Volume 710, 30 November 2025, 163978. 7. Xun Lv. Effects of the V-groove property for machining miniature balls using a plate with discontinuous sectors of fixed abrasives. *Precision Engineering*. Volume 96, October 2025, Pages 147-159.

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТОКАРНОГО РІЗАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

**Мальон А.В., Ступницький В.В.**

*НУ «Львівська політехніка», м.Львів, Україна)*

Алюмінієві сплави широко застосовуються в сучасному машинобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості завдяки високому співвідношенню міцності до маси, корозійній стійкості та добрій оброблюваності [1, 3]. Водночас процес механічної обробки алюмінієвих сплавів супроводжується значними тепловими та силовими навантаженнями, які впливають на якість поверхні, стійкість інструменту та енергетичні показники процесу різання [2]. У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних програмних комплексів для чисельного аналізу процесів різання.

Одним із ефективних інструментів дослідження процесів пластичного деформування та механічної обробки є програмне середовище DEFORM-2D, яке базується на методі кінцевих елементів. Використання чисельного моделювання дозволяє отримати інформацію про розподіл температур, напружень, деформацій і сил різання без проведення великої кількості дорогих експериментальних досліджень.

Метою роботи є дослідження впливу режимів різання на сили та температури у зоні різання під час токарної обробки алюмінієвого сплаву AL6061 із використанням DEFORM-2D.

Для моделювання процесу різання було використано препроцесор Machining (Cutting) програмного комплексу DEFORM-2D. У ході підготовки задачі задавалися геометричні параметри інструменту та заготовки, характеристики матеріалів, параметри сітки скінченних елементів, коефіцієнт тертя, теплопередачі та режими різання. Матеріалом заготовки було обрано алюмінієвий сплав AL6061, а матеріалом різального інструменту — карбід вольфраму WC.

У дослідженні розглянуто дві групи симуляцій. У першій групі змінювалась глибина різання при постійній швидкості різання, у другій — швидкість різання при сталій глибині. Подача в усіх випадках залишалася незмінною.

Після завершення симуляцій результати аналізувалися у постпроцесорі DEFORM-2D Post. За допомогою функцій Graph та Summary були отримані числові значення сил різання і температур у зоні контакту інструменту із заготовкою. На основі отриманих даних будувалися графіки зміни параметрів у часі та визначались усереднені значення.

Результати дослідження показали, що збільшення глибини різання призводить до суттєвого зростання сумарної сили різання та температури у зоні контакту. Найбільше тепловиділення спостерігається у зоні сходження стружки по передній поверхні інструменту, що пояснюється інтенсивною пластичною

деформацією матеріалу та тертям. Встановлено, що вплив глибини різання на сили різання є значно сильнішим порівняно зі зміною швидкості різання.

Зі збільшенням швидкості різання також спостерігається зростання температури та сил різання, однак ця залежність має менш виражений характер. На високих швидкостях різання температурні криві демонструють тенденцію до стабілізації, що може бути пов'язано з інтенсивнішим тепловідведенням у матеріалі заготовки.

На рис. 1 наведено приклад роботи програмного комплексу DEFORM-2D під час моделювання процесу токарної обробки. Програма дозволяє виконувати аналіз процесів пластичного деформування та механічної обробки методом скінченних елементів, а також отримувати візуальні результати розподілу температур, напружень, деформацій і сил у зоні різання. Представлене температурне поле дає можливість оцінити теплові процеси, що виникають під час контакту інструменту із заготовкою.

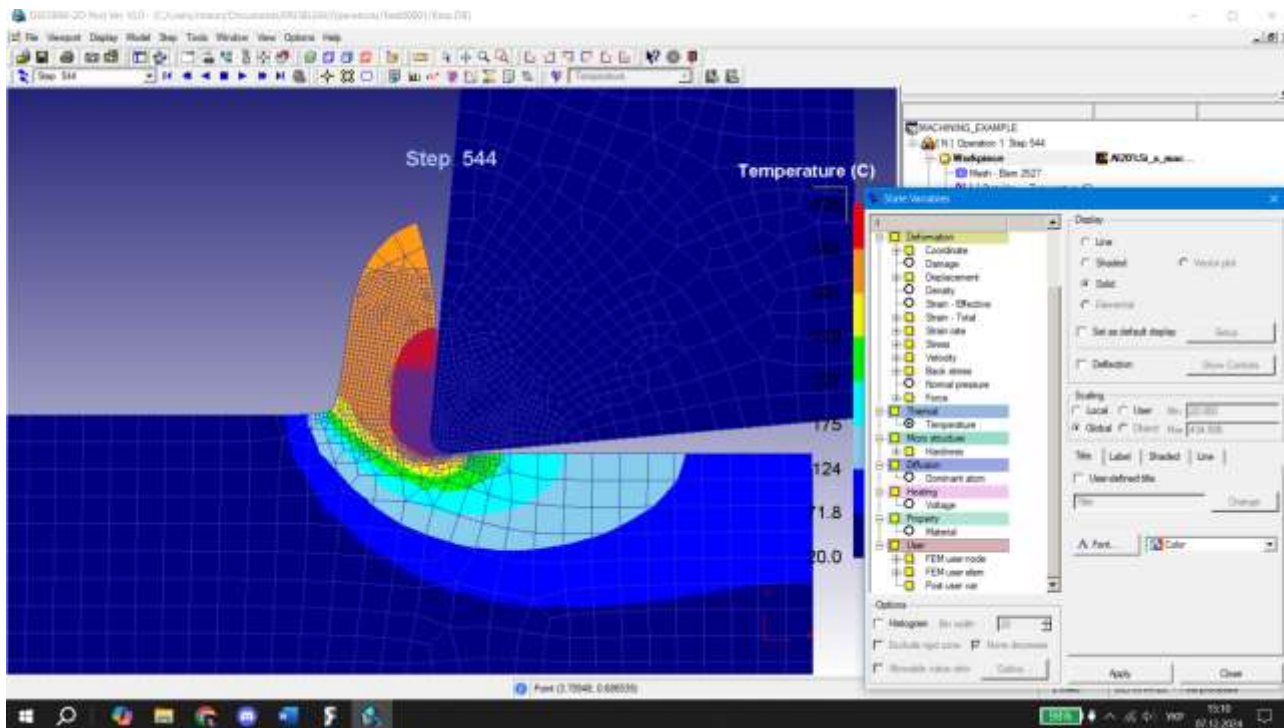


Рис. 1. Температурне поле у зоні різання під час моделювання процесу токарної обробки в

Отримані результати підтверджують ефективність використання DEFORM-2D для аналізу процесів механічної обробки алюмінієвих сплавів. Чисельне моделювання дозволяє оцінити вплив технологічних параметрів на стан зони різання та може бути використане для оптимізації режимів обробки, підвищення стійкості інструменту та покращення якості обробленої поверхні.

**Література:** 1. Santos M.C., Machado A.R., Sales W.F., Barrozo M.A.S., Ezugwu E.O. Machining of aluminum alloys: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — Vol. 86. — P. 3067–3080. 2. McCabe J., Ostraff M.A. Performance Iss. 12. — P. 22–27. 3. Rooy E.L. Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys // Materials Park : ASM International, 1990. — 3469 p.

# ВПЛИВ БАГАТОШАРОВОЇ АРХІТЕКТУРИ ТЕРМОБАР'ЄРНОГО ПОКРИТТЯ НА ТЕРМІЧНУ СКЛАДОВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

<sup>1</sup>Манохін А.С., <sup>1</sup>Клименко С.А., <sup>1</sup>Клименко С.А., <sup>1</sup>Копейкіна М.Ю.,

<sup>1</sup>Чумак А.О., <sup>2</sup>Камчатна-Степанова К.В.

(<sup>1</sup>ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, <sup>2</sup>НТТУ «ХПІ» м. Харків, Україна)

Теплові бар'єрні покриття (ТВС), отримані методом фізичного осадження з парової фази (PVD), зокрема електронно-променевого PVD (ЕВ-PVD), широко застосовуються для захисту лопаток газових турбін завдяки не лише низькій теплопровідності, а й характерній колонковій мікроструктурі, що забезпечує високу термоциклічну стійкість. Напружено-деформований стан системи ТВС–ВС, яка складається з термобар'єрного шару ( $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$ ) та зв'язуючого шару (MeCrAlY), залишається визначальним фактором, що контролює утворення тріщин у колонкових структурах, локальне руйнування та втрату адгезії ТВС [1,2]. У цьому контексті моделювання напружень у таких системах з урахуванням геометричних параметрів покриттів є важливим інструментом для оптимізації їх архітектури та прогнозування довговічності покриттів.

В даній роботі залежності між напружено-деформованим станом в термозахисному покритті та архітектурою покриття визначали шляхом розв'язання методом скінчених елементів двовимірної пружно-пластичної задачі у постановці плоскої деформації. Метою дослідження є оптимізація за параметром напруженого стану геометричних параметрів шарів покриття, яке складається з одного або декількох зв'язуючих металевих (ВС) та термобар'єрних керамічних (ТВС) шарів (Bond Coating - Thermal Barrier Coating).

Для обох типів шарів було задано температурно залежні пружні, а для ВС шарів - додатково пластичні (білінійна модель пластичності) властивості матеріалу. Геометрично 2D модель представлено у двох варіантах: - варіант 1 - двошарове (бінарне) покриття: основа, зв'язуюче покриття (ВС) зі складом NiCrAlY товщиною 0,1 мм та термобар'єрний шар (ТВС) з покриття товщина якого також 0,1 мм; варіант 2 - мультішарове, яке складається з  $n$  пар металевих та керамічних прошарків товщинами  $h_1$  та  $h_2$ . Довжина та умовна ширина моделей становлять 1,5 та 1 мм відповідно. Сумарна товщина прошарків з ВС та ТВС в багатошаровому покритті дорівнювала товщині відповідних шарів ВС та ТВС у бінарній системі.

Граничні умови моделювання передбачають нагрів верхньої поверхні покриття до максимальної температури 1200 °С при охолодженні нижньої границі системи тепловим потоком  $q$ . Значення  $q$  прийнято рівним  $-2e6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Розрахунок параметрів моделі складався з кількох етапів: 1) вирішення структурної задачі з визначенням залишкових напружень, що виникають внаслідок охолодження моделі від температури нанесення покриття 950 С° до кімнатної температури; 2) вирішення стаціонарної задачі теплопровідності для визначення температурного поля, що виникає в моделі за умов її нагрівання до

високих температур (1200 °C), що відповідають робочому тепловому навантаженню лопаток турбін; 3) зміна типу кінцевих елементів і переключення моделі в режим розв'язку структурної задачі по визначенню напружено-деформованого стану моделі після загрузки в модель розрахованих на попередніх етапах значень залишкових напружень (етап 1) та температурного поля (етап 2).

Оцінка пошкоджувальних факторів проводилася на основі аналізу як абсолютних значень напружень, так і амплітуд їх термічно індукованої зміни протягом температурного циклу. Максимальне значення напруження розтягу YSZ, в той час як амплітуда зміни напружень між температурами 20 та 1200 °C розглядалася як міра інтенсивності термоциклічного навантаження, що обумовлює ймовірність появи міжфазної тріщини на поверхні розділу металевий підшар-термобар'єрна кераміка:

Інтенсивність термоциклічного навантаження покриття в зоні прилеглої до міжфазних границь для системи покриттів NiCrAlY + (ZrO<sub>2</sub> + 8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) становить:

бінарна система

$$\Delta S_x = |S_x^{1200} - S_x^{20}| = 0,096 - (-0,387) = 0,483 \text{ ГПа}$$

багатошарова система

$$\Delta S_x = |S_x^{1200} - S_x^{20}| = 0,082 - (-0,387) = 0,469 \text{ ГПа.}$$

Як можна бачити, багатошарова система дозволяє лише в незначній мірі знизити інтенсивність термоциклічного навантаження при нагріванні поверхні лопатки від температури зовнішнього середовища до робочої температури. Вплив архітектури покриття на даний показник становить для  $\Delta S_x$  3–5%. В той же час суттєвим є вплив даного параметру на максимальні значення розтягуючих осьових напружень в керамічних шарах покриття. При високих температурах (1100–1200 °C) вони зменшуються на ~15% (з 0,096 до 0,082 ГПа). Враховуючи, що структура покриттів зумовлює відносно низькі значення характеристик міцності, отримані результати свідчать про можливість зниження ймовірності деламінації покриття від металевого підшару у випадку використання багатошарових термобар'єрних покриттів на заміну стандартних двошарових.

#### Література:

1. Evans A. G., Mumm D. R., Hutchinson J. W., Meier G. H., Pettit F. S. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Progress in Materials Science. – 2001. – Vol. 46. – P. 505–553.
2. Clarke D.R., Oechsner M., Pature N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines // MRS Bulletin. – 2012. – Vol. 37. – P. 891–898.

## СИСТЕМНО- СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ БЛОЧНО-МОДУЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІНСТРУМЕНТІВ

**Мироненко Є.В., Гончаров С.П.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Основними компонентами технологічної системи є різальні інструменти. У багатоелементних конструкціях блочно-модульних інструментів характеристики продуктивності значною мірою визначаються умовами взаємодії контактних поверхонь. Зі зростанням використання кількості гнучких обробних центрів в промисловості та розвитком робототехніки, призвело до створення нового типу збірних інструментів із впровадженням замінного елемента блочної вставки в їхню конструкцію. Блочність конструкції відкриває можливість одночасно формувати захвати для автоматичної заміни блоків при створенні інструментів такої конструкції. Якість виробу, включаючи ріжучий елемент, формується на багатьох етапах, починаючи з його преформування. Системно-структурний аналіз є одночасно як завершенням проектування, так і початком технологічної підготовки виробництва, що полягає в аналізі надійності інструментів і складових параметрів, що мають вирішальний вплив на якість виробу. Запропонований системний підхід використовує загальну теорію систем, яка вивчає загальні закони функціонування взаємопов'язаних об'єктів у прикладних областях і реалізується у формі системного аналізу. Де формулюються такі методологічні принципи: органічна цілісність суб'єктивного та об'єктивного; структуру; динамізм системи; міждисциплінарність; органічна єдність формалізованого та неформалізованого.

Що стосується інструмента, перший принцип реалізується у збірних конструкціях інструментів через взаємозв'язок і різницю між системою властивостей, що визначають якість цього інструмента, і властивостями металорізних інструментів загалом. Другий принцип надає системі інструментів цілісність і визначає її стабільний стан. Третя передбачає гнучкість і розвиток системи. Складність об'єкта дослідження визначає четвертий і п'ятий принципи системного підходу. Такий підхід відкриває новий рівень можливостей управління якістю блочних структур і інструментів. Цього досягають, перш за все, шляхом налаштування конструктивних елементів так, щоб забезпечити необхідні параметри з вибором відповідних модулів. По-друге, забезпечення заданих експлуатаційних характеристик блочного інструменту.

## ПСИХОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ МЕНЕДЖЕРА

**Михальчук А. О., Віштак І. В.**

*(ВНТУ, м. Вінниця, Україна)*

В сучасних умовах динамічного розвитку глобальної економіки та постійних соціальних трансформацій професійна діяльність менеджера стає дедалі складнішою, багатогранною та насиченою інтенсивними психологічними викликами. Психологічна безпека праці в сучасній парадигмі управління перестає бути лише питанням відсутності фізичних загроз чи технічних несправностей, трансформуючись у складну, багаторівневу систему захищеності психіки від деструктивних впливів робочого середовища [1,2]. Менеджер як ключова фігура управління та прийняття рішень постійно перебуває в самому епіцентрі стресогенних ситуацій, що вимагає від нього не лише глибоких фахових знань, а й надзвичайно високого рівня психологічної стійкості та адаптивності [3].

Актуальність даного дослідження зумовлена тим фактом, що від стабільного психоемоційного стану керівника безпосередньо залежить безпека складних виробничих процесів, загальний морально-психологічний клімат у колективі та життєдіяльність усієї організації як єдиного організму. В умовах глобальної нестабільності, зокрема під час воєнних конфліктів, безпека діяльності персоналу прямо залежить від здатності менеджменту підтримувати процеси соціалізації та зберігати працездатність у колективі навіть під тиском зовнішніх загроз. Таким чином, психологічний комфорт керівника стає одним з базових ресурсів для забезпечення виживання та розвитку підприємства у кризові періоди.

Психологічні аспекти безпеки праці менеджера сьогодні охоплюють надзвичайно широке коло питань, що нерозривно пов'язані як із внутрішнім станом особистості, так і з об'єктивними зовнішніми умовами праці [1]. Одним із фундаментальних, центральних елементів цієї системи є психологічна стійкість. Вона визначається не просто як пасивний опір труднощам, а як активна здатність людини зберігати високу працездатність, ясність мислення та адекватність прийнятих рішень навіть у критичних, нестандартних ситуаціях [2]. В управлінській діяльності психологічна безпека проявляється через стан суб'єктивної та об'єктивної захищеності індивіда від інформаційних перевантажень, зтяжних соціальних конфліктів та постійного емоційного тиску з боку стейкхолдерів. Постійна напруженість в економічному секторі та дедалі складніші умови праці викликають у менеджерів хронічні психічні перевантаження. Такі стани можуть призводити як до тимчасової мобілізації прихованих ресурсів організму, так і до небезпечного зриву працездатності чи розвитку серйозних нервово-психічних розладів [3].

Особливе, критичне значення для сучасної науки має проблема професійного вигорання. Це явище часто є закономірним наслідком тривалого перебування менеджера у токсичному або надмірно стресовому середовищі без можливості отримати належну психологічну розрядку чи підтримку [2]. Вигорання неминуче веде до деформації особистості, зниження концентрації уваги та втрати когнітивної гнучкості. В управлінській сфері це стає критичним фактором ризику, оскільки провокує фатальні помилки у прийнятті стратегічних рішень та системні порушення норм техніки безпеки [4]. Перебуваючи у стані гострого або хронічного стресу, менеджер може підсвідомо ігнорувати потенційні загрози, що створює пряму небезпеку не лише для нього особисто, а й для всього персоналу та активів організації загалом [5]. Крім того, умови війни та соціальної турбулентності породжують у працівників цілу низку специфічних стресових ситуацій та психологічних викликів (таких як страх, тривога за майбутнє, втрата орієнтирів), що суттєво знижують їхню ефективність та руйнують психічне здоров'я [6].

Наступним важливим складником безпеки праці, який неможливо ігнорувати, є соціально- психологічний клімат та стійка організаційна культура. Лідерство в контексті психологічної безпеки сьогодні передбачає не лише роздачу вказівок, а насамперед створення такої культури, де безпека та людина є основними цінностями. У такому середовищі працівники відчують реальну підтримку та мають можливість вільно, без страху санкцій, висловлювати свої спостереження чи занепокоєння щодо робочих процесів [5]. Ефективний менеджер сучасної формації повинен досконало володіти навичками саморегуляції та вмінти вчасно впроваджувати дієві механізми психологічної допомоги для своїх підлеглих [2]. Більше того, психологічна безпека на сучасному підприємстві включає обов'язкове навчання персоналу навичкам психологічного самозахисту, правилам екстреного реагування в умовах кризи та створення надійних систем оперативної внутрішньої комунікації [5-7].

Окрім внутрішньо-особистісних чинників, загальна безпека праці менеджера критично залежить від налагодженої системи комунікації всередині компанії [5]. Відкрита атмосфера, прозорість управлінських процесів та чесний діалог між рівнями ієрархії суттєво знижують загальний рівень тривожності в колективі та запобігають виникненню деструктивних, прихованих конфліктів [1]. Психологічний комфорт на робочому місці є потужним стимулом, що сприяє формуванню лояльності працівників та значно підвищує загальну стійкість організації до агресивних зовнішніх викликів [7]. Організаційна культура здатна як нівелювати, так і посилювати сприйняття ризиків персоналом. Створення культури, де безпека є безумовним пріоритетом, сприяє не лише виконанню нормативів, а й глибокому усвідомленню кожним працівником своєї ролі у забезпеченні спільного благополуччя.

Підсумовуючи проведене дослідження, можна з упевненістю стверджувати, що психологічні аспекти безпеки праці менеджера є фундаментальною, базисною основою стабільного та успішного функціонування будь-якого сучасного підприємства. Ефективність управління в умовах постійної невизначеності стає просто неможливою без системного врахування чинників професійного вигорання, розвитку стресостійкості керівної ланки та підтримки загального психологічного благополуччя колективу. Сьогодні головним стратегічним завданням топ-менеджменту стає проектування та розвиток такої організаційної культури, де психологічна безпека органічно інтегрована в щоденну діяльність, а лідерство базується на емпатії та щирій турботі про ментальне здоров'я працівників.

Лише через гармонійне поєднання високої професійної компетентності та розвиненої психологічної культури можна досягти того рівня безпеки праці, який реально відповідає суворим вимогам часу. Сучасна організація, що прагне лідерства, повинна мати чітко відпрацьовані механізми психологічної підтримки, надавати працівникам безперешкодний доступ до професійного консультування та допомоги для забезпечення їхнього психічного комфорту.

Результати проведеного аналізу ще раз підтверджують, що психологічна безпека є складним інтегральним показником. Вона об'єднує в собі унікальні індивідуальні особливості психіки менеджера, системні заходи організації та загальну філософію безпеки, що стає запорукою виживання бізнесу в епоху змін.

#### **Література:**

1. Демідова Ю. Є., Мовмига Н. Є. Формування культури безпеки діяльності при викладанні безпекових дисциплін // Актуальні проблеми науки та освіти. 2023. № 3 (9). С. 385–397.
2. Зубенко І. Р. Психологічні особливості формування професійних якостей менеджера електронної комерції : дис. ... [Електронний ресурс]. Острого : Національний університет «Острозька академія», 2014.
3. Твердохлебова Н. Є. Психологічні аспекти безпеки праці // Modern directions of scientific research development : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (28–30 вересня 2021 р., Chicago, USA). Chicago: VoScience Publisher, 2021. С. 141–145. Режим доступу:
4. Бернацький М. В. Інженерні та психологічні аспекти безпеки праці // Безпека праці: освіта, наука, практика: матеріали конф. 2014. С. 99–102. Режим доступу:
5. Турянський Ю. І., Свидрук І. І., Гнилянська О. В. Соціально-психологічні аспекти гарантування безпеки діяльності персоналу в умовах війни // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки. 2024. № 75. С. 37–43.
6. Vishtak, I., Zaburianova, V., & Lysohub, D. Способи поліпшення умов праці на прикладі вітчизняних закладів готельної індустрії. // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 2025. № 32, С. 190-202.
7. Радченко В. О. Психологічні аспекти безпеки людини в умовах праці // Проблеми надзвичайних ситуацій та безпеки життєдіяльності : зб. наук. праць. 2025. С. 156–160.

# ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРОХОТА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО- ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ

<sup>1</sup>Моркун В.С., <sup>2</sup>Грищенко Я.О.

(<sup>1</sup>КНУ, м. Кривий Ріг, Україна, <sup>2</sup>СНУ ім. В. Даля, м. Київ, Україна)

В процесі підготовки рудної сировини до металургійного переділу вона піддається дробленню, подрібненню, класифікації, сепарації та іншим технологічним операціям. Метою цих операцій є вилучення корисного компонента із видобутої руди та позбавлення кінцевого продукту від шкідливих домішок. Технологічний процес збагачувальних фабрик вимагає періодичної класифікації проміжних продуктів збагачення рудного матеріалу за крупністю її часток. Перспективним напрямком підвищення ефективності та продуктивності цієї операції є застосування грохотів тонкого грохочення руди з комбінованим вібраційним приводом.

Мета роботи полягає в дослідженні динаміки руху просіювальної поверхні та часток подрібненої руди для обґрунтування застосування грохоту тонкого грохочення руди з комбінованим вібраційним приводом, а також визначення залежності якості та продуктивності процесу від параметрів вібрації. Модель просіювальної поверхні грохота може бути представлена у вигляді сукупності сіток і вузлів, а рівняння рівноваги для кожного вузла у вигляді [1]

$$M\ddot{u} = P - I \quad (1)$$

де  $M$  - матриця мас кожного вузла;  $\ddot{u}$  - прискорення;  $P$  - зовнішня сила;  $I$  - внутрішня сила елемента.

У роботі [1] пропонується використовувати метод центральних різниць для вирішення рівняння переміщення шляхом інтегрування швидкості вузла гнучкої ситової плити

$$u|(t + \Delta t) = u|(t) + \Delta t|(t + \Delta t)u'|(t + \frac{\Delta t}{2}) \quad (2)$$

Рух та взаємодія частинок рудного матеріалу на грохоті можуть бути виражені через вектори розгалуження та орієнтації контактних сил у вигляді наступної системи [2]

$$l = l_n n + l_t + t \quad (3)$$

$$f = f_n n + f_t + t \quad (4)$$

де  $l_n$  та  $l_t$  - нормальна і тангенціальна складові векторів розгалуження;  $f$  та  $f_n$  — нормальна і тангенціальна складові контактної сили;  $n$  - одиничний вектор, перпендикулярний до площини контакту;  $t$  - ортонормальний одиничний вектор (напрямок - проти годинникової стрілки);  $(n,t)$  - локальний одиничний фрейм.

Для спрощення моделюванні просіювальної поверхні грохота динаміку його вузлів доцільно представити у вигляді сукупності елементарних блоків, що відображають фізичні властивості пружності, демпфування та маси, і представляти їх із застосуванням програмного продукту Simscape Matlab/Simulink® [3]. На рис. 1 наведена схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом, що використовується для реалізації процесу тонкого грохочення руди.

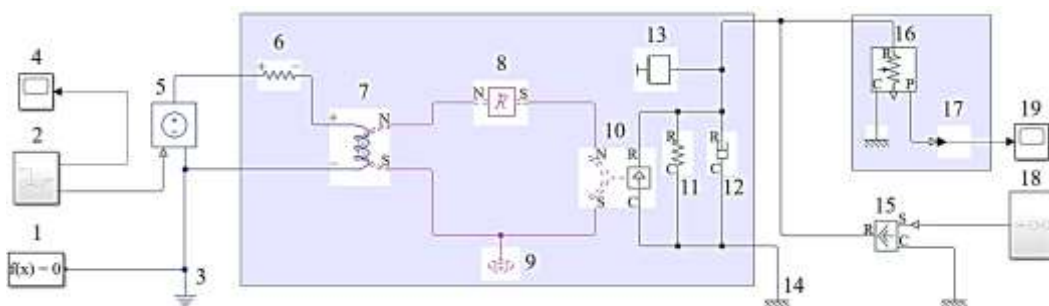


Рис. 1. Схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом

Електромагнітний привод вібросіта моделюється за допомогою магнітних блоків. Струм через котушку електромагніту створює магніторушійну силу ( $MMF$ ), яка рухає магнітний сердечник. Створюється сила опору, яка змушує плунжер закривати повітряний зазор, а магнітний потік в магнітопроводі зростає зі зменшенням довжини повітряного проміжку. В результаті чого маємо зміни амплітуди переміщення поверхні вібросіта у часі від прикладеного електромагнітного впливу з частотою 100 Гц і електромеханічного впливу частотою 10 Гц, як на рис. 2.

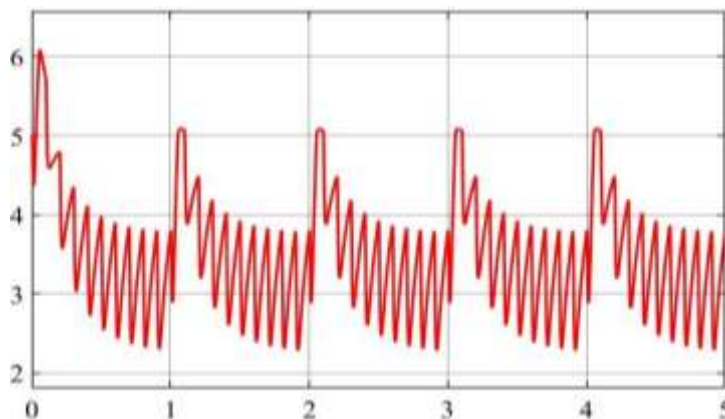


Рис. 2. Амплітуда переміщення (мм) поверхні вібросіта у часі ( $\times 0,1$  с)

Схожі результати моделювання дії аналогічних впливів на зміни швидкості переміщення поверхні вібросіта, продемонстровано на рис. 3.

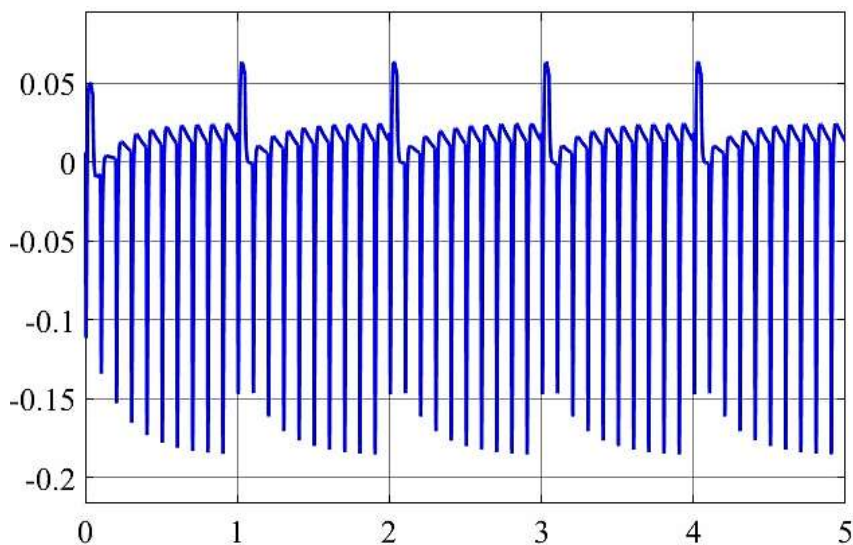


Рис. 3. Швидкість переміщення (м/с) поверхні вібросіта у часі ( $\times 0,1$  с)

Наведена на рис. 1 модель практично відображає можливості комбінованого віброприводу грохота тонкого грохочення рудного матеріалу щодо регулювання амплітуди, частоти та фази коливань просіювальної поверхні.

Таким чином характеристики процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. До параметрів вхідного рудного матеріалу віднесено загальну масу, концентрацію твердої фази та його гранулометричний склад. Параметрами вібрації визначено: нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації.

#### Література:

1. Xu N. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method [Electronic resource] / N. Xu, X. Wan, D. Lin, W. Zuo // Minerals. — 2024. — Vol. 14. — P. 278. — Mode of access: [https:// doi.org/10.3390/min14030278](https://doi.org/10.3390/min14030278) (date of access: 26.04.2026). — Title from screen.
2. Azema E. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles [Electronic resource] / E. Azema, F. Radja // PHYSICAL REVIEW E. — 2012. — Vol. 85, no. 031303. — Mode of access: DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031303 (date of access: 26.04.2026). — Title from screen.
3. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. [Electronic resource] — Access mode: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (date of access: 26.04.2026). — Title from screen.

# РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ЗБІРНИХ РІЗЦІВ ДЛЯ ТОЧІННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ

Міранцов С.Л., Хорошайло В.В., Рябченко М.В.

ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Вступ. Підвищення продуктивності механічної обробки є пріоритетним завданням сучасного машинобудування. Одним із ефективних шляхів є використання верстатів з ЧПК та прогресивного збірного інструменту, що забезпечує високу міцність та жорсткість конструкції. Особливий інтерес становлять різці для багатонаправленої токарної обробки (БТО) (рис. 1), які дозволяють поєднувати поздовжнє точіння, розточування, відрізання та прорізання канавок. Концентрація операцій у межах одного інструменту висуває підвищені вимоги до його жорсткісних та динамічних характеристик, що і зумовлює актуальність даного дослідження.

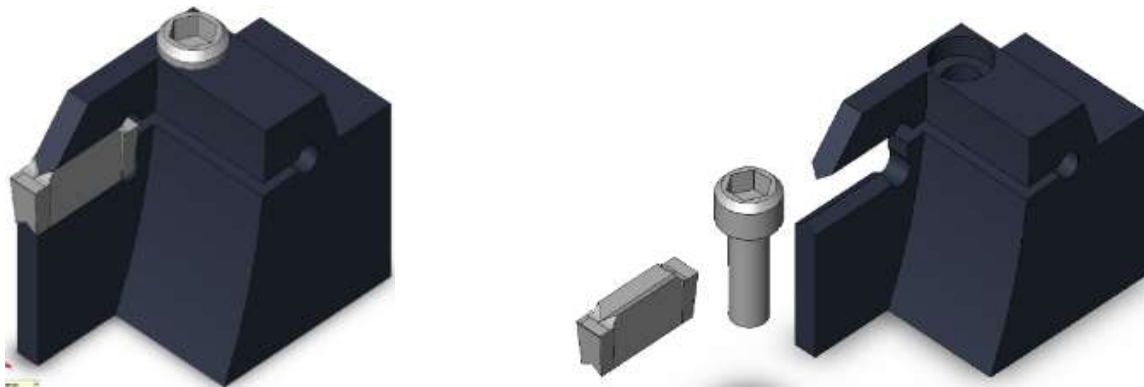


Рис. 1. Зовнішній вигляд збірної різця БТО

Мета і методика дослідження. Метою роботи є аналітичне визначення жорсткісних та динамічних характеристик різця МТО. Дослідження виконувалося за двома напрямками:

- статичний аналіз (визначення пружних переміщень вершини різця);
- динамічний (гармонічний) аналіз (оцінка ризику резонансу).

При виконанні аналізу в якості граничних умов, були прийняті наступні:

- корпус інструменту зафіксована без переміщень;
- між дотичними гранями і поверхнями елементів має місце контакт з тертям, тобто дотичні поверхні можуть переміщуватися один щодо одного і між ними може виникати зазор (рис. 2).

Режими обробки, при яких проводився аналіз, визначалися згідно рекомендації [1, 2]:

$$f_{max}(s_{max}) = 0,075W, \quad a_{p\ max}(t_{max}) = 0,8W,$$

де  $f_{max}(s_{max})$ ,  $a_{p\ max}(t_{max})$  - рекомендовані максимальні значення подачі інструменту і глибини різання відповідно;  $W$  - ширина ріжучої пластини інструменту.

Таким чином, при поздовжньому точінні зовнішньої поверхні  $t_{\max} = 4$  мм,  $s_{\max} = 0,37$  мм/об, а при прорізуванні канавок і відрізанні максимальне значення подачі інструменту становить  $s_{\max} = 0,37$  мм/об,  $t_{\max} = 5$  мм.

Дослідження виконано аналітично з використанням скінченно-елементних моделей у пакетах SolidWorks та Ansys.

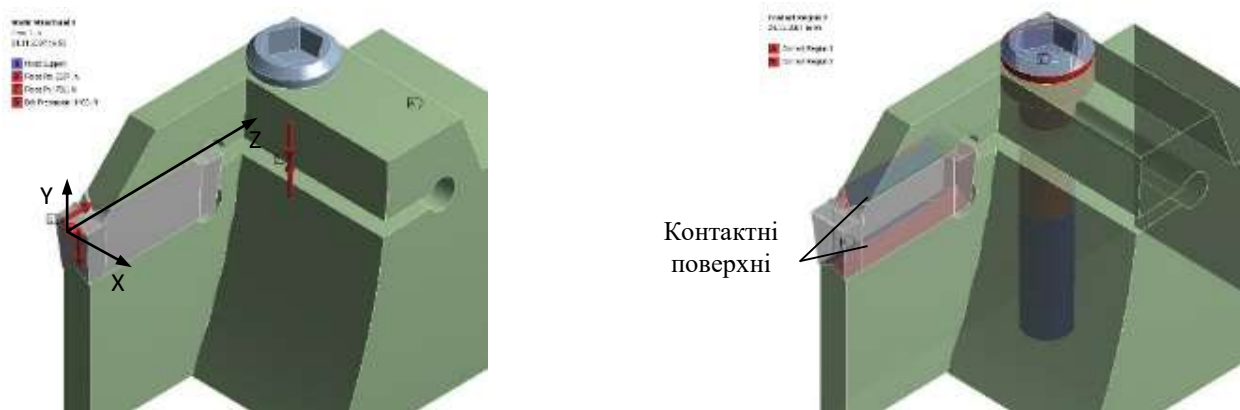


Рис. 2. Розрахункова схема збірної конструкції різця БТО

Результати дослідження. На підставі проведених аналітичних досліджень різців для багатонаправленої токарної обробки можна зробити наступні висновки:

1. При поздовжньому точінні різцем МТО спостерігаються пружні зміщення вершин різальної пластини у напрямку осі X та поворот пластини, максимальні значення яких спостерігаються при  $t = 2,5$  мм,  $s = 0,80$  мм/об і становлять  $0,23$  мм та  $0,65^\circ$  відповідно. Це вимагає під час обробки для отримання заданої точності коригування положення інструменту.

2. Аналіз амплітудно-частотних характеристик показав, що у напрямку осі X явище резонансу в режимі вимушених коливань різця може настати на частотах близько  $5$  кГц та  $10$  кГц, при цьому максимальна амплітуда коливань різальної пластини, згідно з результатами досліджень до  $2$  мм. Це свідчить про втрату працездатності інструменту в разі настання резонансу.

3. З метою підвищення жорсткості збірної конструкції різця для багатовекторної токарної обробки запропоновано конструктивне рішення яке полягає у тому, що дно пазу корпусу інструменту виконане нахиленим відносно його бічної поверхні у сторону різальної пластини на певний кут і це дозволяє отримати більш рівномірний розподіл контактних навантажень між контактними поверхнями корпусу й різальної пластини.

#### Література:

1. Музикант А.Я. Конструкції інструменту і технологія багатонаправленої токарної обробки (БТО) на верстатах з ЧПК // Технологія металів. – № 5 – 2007 – С. 31. 2. ISCAR. Загальний каталог. © ISCAR LTD.

# ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО РОЗТАШУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ПЛАСТИН НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ

**Мірошниченко О.В.**

(ДВНЗ «ДонНТУ», м. Дрогобич, Україна)

## 1. Вступ

Відбудова залізничної інфраструктури України у післявоєнний період вимагатиме застосування високотехнологічних рішень, що забезпечують максимальну продуктивність виконання операцій. Одним із критичних процесів є свердління отворів у рейках під кріпильні елементи. Використання збірних твердосплавних свердел з багатограничними непереточуваними пластинами (БНП) супроводжується проблемою швидкого зношування та нестабільності процесу. Ключовим чинником втрати працездатності інструмента є дисбаланс сил різання, особливо невідносна радіальна складова [1–3].

## 2. Мета досліджень

Метою роботи було визначення впливу конструктивних параметрів збірних свердел на формування радіальної складової сили різання та пошук оптимальних геометричних рішень, що забезпечують стабільність процесу та довговічність інструмента при свердлінні рейок.

## 3. Методика досліджень

Використано аналітичні моделі для розрахунку елементарних складових сили різання вздовж ділянок різальних кромки [4,6].

Застосовано емпіричні залежності, що враховують середні геометричні параметри та дозволяють оцінити силове навантаження [5,7].

Проведено геометричний аналіз взаємного розташування пластин у корпусі свердла. Для цього ділянки різальних кромки подано у вигляді відрізків прямих, визначено координати точок їх перетину та довжини робочих ділянок (рис. 1–3).

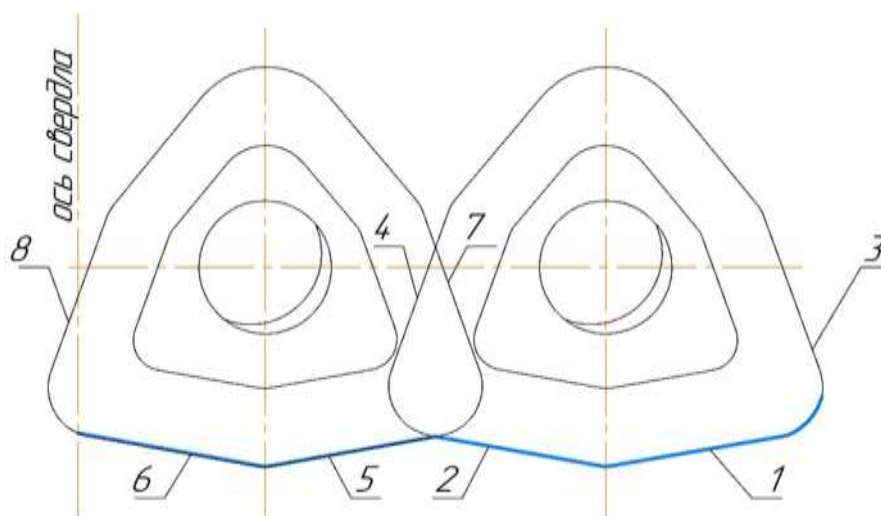


Рис. 1. Розподілення різальних кромки на окремі ділянки

Використано координатний підхід для формалізації задачі та побудови моделей взаємодії інструмента з матеріалом рейки.

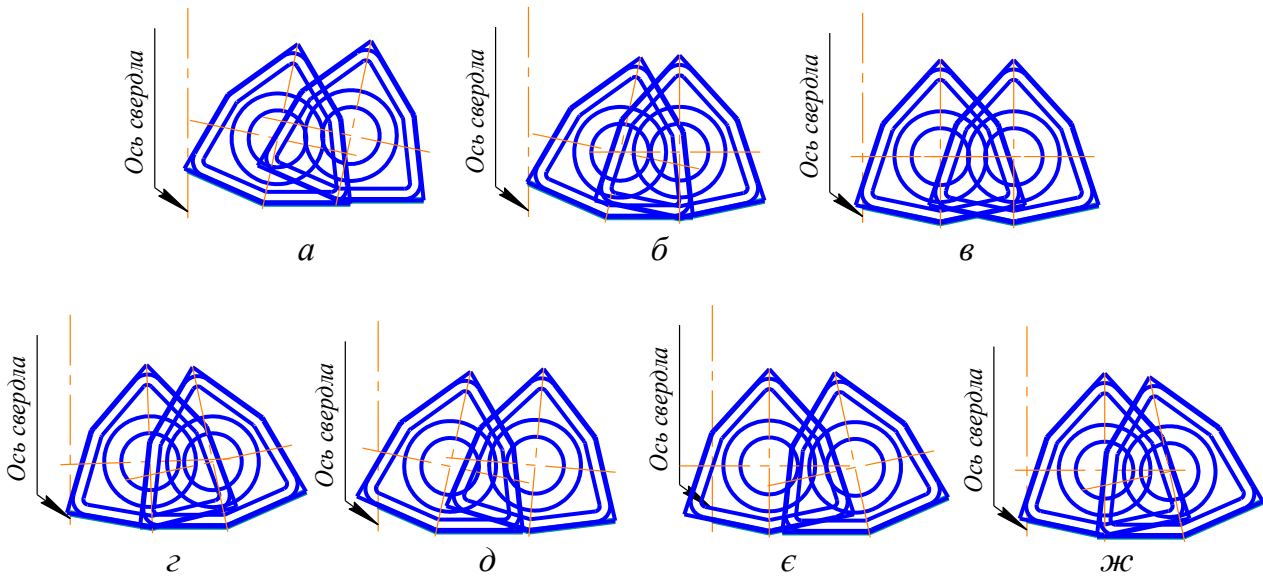


Рис. 2. Можливі варіанти взаємного розташування різальних пластин у корпусі свердла

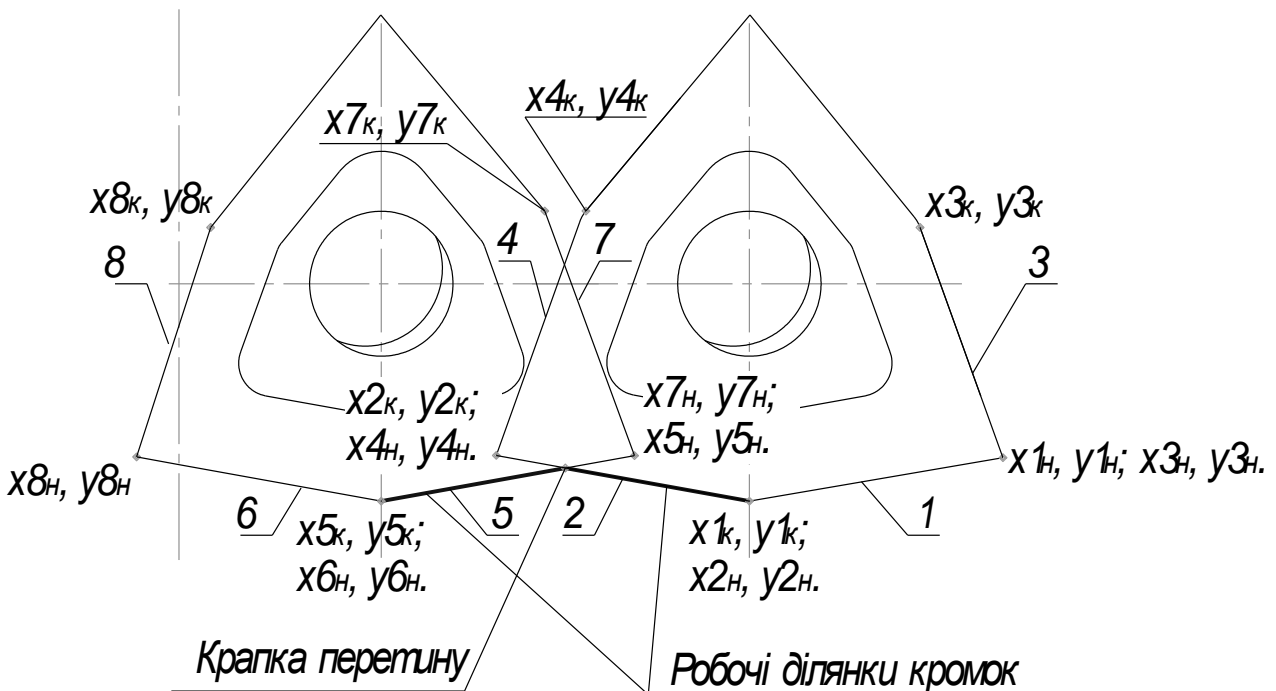


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення довжини робочих ділянок

Розраховано поверхні відгуку радіальної невірноваженої сили при варіюванні кутів установки пластин у діапазоні 0–24° з кроком 1°.

Для перевірки результатів застосовано як аналітичні, так і емпіричні моделі, що дозволило зіставити отримані дані та підтвердити їх достовірність [8].

#### 4. Основні результати

Встановлено залежність між геометрією інструмента та рівнем силового дисбалансу.

Виявлено оптимальні параметри: кут розвороту центральної пластини  $\chi_1 = 24^\circ$  та периферійної пластини  $\chi = 4^\circ$ .

Така комбінація забезпечує мінімізацію невірноваженої радіальної складової сили різання при свердлінні отворів діаметром 36 мм.

Застосування методики дозволяє знизити вібраційні навантаження та підвищити стабільність процесу свердління.

#### Висновки

1. Дисбаланс сил різання є визначальним фактором зниження працездатності збірних свердел.
2. Геометричні параметри пластин мають вирішальний вплив на формування радіальної складової сили різання.
3. Оптимізація кутів установки пластин дозволяє мінімізувати силову невірноваженість та підвищити ефективність процесу.
4. Запропонований підхід може бути використаний для проектування інструментів нового покоління, що особливо актуально у контексті відновлення залізничної інфраструктури України.

**Література:** 1. Zhang, H.; Shuai, W.; Liu, L.; Zhang, P.; Zhang, K.; Lin, H.; Zhang, Y.; Li, W. Prediction of Rail Wear Under Different Railway Track Geometries Using Artificial Neural Networks. *Infrastructures* 2025, 10, 154. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10070154> 2. Thamm A., Wiedemann M., Bretschneider J., Müller T. Deep learning based drill wear segmentation and analysis of the wear progress. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024. Vol. 19. P. 5447–5459. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02045-0> 3. Lian Y.-S., Zhang M., Chen X.-H., Zhou L. Cutting performance optimization and experimental research of indexable insert drill. *Advances in Manufacturing*. 2024. Vol. 13. P. 303–321. <https://doi.org/10.1007/s40436-024-00507-y> 4. Гриньов Ю.О. Розподіл складових сили різання вздовж різальних кромки багатограничних непереточуваних пластин при свердлінні збірними свердлами / Ю.О. Гриньов, О.В. Мірошніченко, Т.А. Воеводіна //Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. 2012. - Вип. 29. – С. 24 – 28. 5. Гриньов Ю.О. Визначення складових сили різання при свердлінні збірними свердлами. /Ю.О. Гриньов, О.В. Мірошніченко, Т.А. Воеводіна, А.Б. Воеводін, В.В. Кундеус //Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. 2012. - Вип. 43. – С. 114 – 119. 6. Jiang, A., Liu, Z., Wang, S., Wen, J., Li, Y., & Zhao, J. (2023). Optimized design of indexable insert drill based on radial cutting force balance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(8), 2029–2041. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12063-z> 7. Bălan M., Popan I. A., Popan A. I., Carean A., Cosma S. C. Analysis of process parameters influence on drilling process. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. Article No. 02011. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20179402011> 8. Qiao Q., Li G., Huang R., Pu J., Zhao X. Research on the key technologies and applications of finite element simulation for drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 136, No. 7. P. 3111–3130. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15060-6>

## НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ВНУТРІШНЮ ПОВЕРХНЮ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СТВОЛА

<sup>1</sup>Надтока В.М., <sup>2</sup>Дейнеко Л.М., <sup>1</sup>Краєв М.В.

(<sup>1</sup>ДП «КБ «Південне», м. Дніпро, Україна, <sup>2</sup>УДУНТ, м. Дніпро, Україна)

Стволи артилерійських систем незалежно від рівня міцності металу в процесі експлуатації зазнають зношення і ерозії поверхні каналу внаслідок впливу високих температури та тиску агресивного середовища і механічних навантажень. Основними вимогами до захисного покриття є хімічна стійкість покриття до впливу порохових газів і його висока температура плавлення (не нижче 1500°C) [1]. ДП «КБ «Південне» має в своєму розпорядженні експериментальну установку для нанесення покриттів на канали стволів танкової гармати вакуумно-дуговим методом [2]. На цьому обладнанні були проведені роботи по відпрацюванню технології нанесення захисного покриття хрому на канали гарматних стволів калібру 125 мм. Вогневі випробування ствола з покриттям хрому показали, що його живучість підвищилась в 2,7 рази порівняно з незахищеним стволом.

Нанесення покриття здійснювалось з допомогою електродугового випарника з циліндричним катодом діаметром 60 мм та довжиною 250 мм, зовнішній вигляд якого приведено на рис. 1а. В процесі роботи електродугового випарника потік металевої плазми конденсується на внутрішній поверхні ствола. Потужність розряду становить близько 7 кВт, тому при конденсації покриття йде інтенсивний нагрів ділянки гарматного ствола, на яку направлений потік плазми. Покриття на канал гарматного ствола наноситься після його термічної обробки, тому для запобігання відпуску металу ствола його температура не повинна перевищувати 360 °С. Як показали експерименти, проведені на технологічному стволі, при нанесенні покриття без його осьового переміщення температура ділянки ствола протягом 30 хвилин підіймається до 420 °С. Для забезпечення допустимої температури ствола електродуговий випарник металів переміщувався в процесі нанесення покриття вздовж осі ствола. Для одержання необхідної товщини покриття випарник необхідно неодноразово (10-12 разів) переміщувати над кожною ділянкою внутрішньої поверхні.

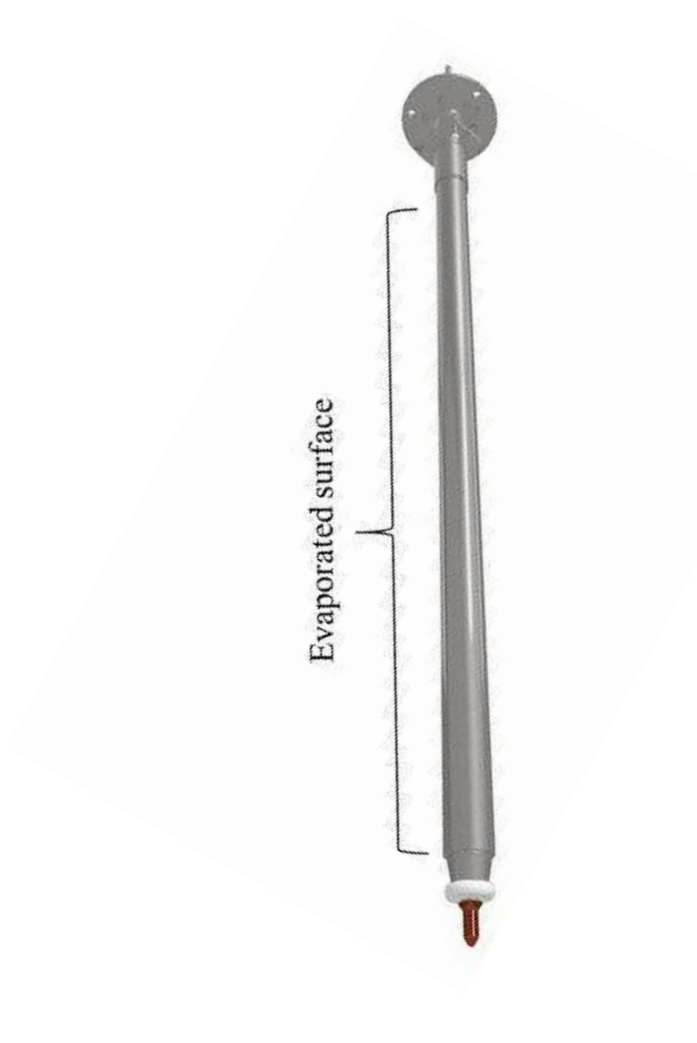
Метою роботи було створення електродугового випарника зі збільшеною довжиною, що при тій же потужності дугового розряду значно знизить тепловий

потік на одиницю площі внутрішньої поверхні. Це дозволить значно спростити технологію нанесення покриттів та підвищити їх якість.

Розроблено і виготовлено електродуговий випарник металів з циліндричним катодом діаметром 57 мм та довжиною 1000 мм (рис. 1б). Випаровування металу з поверхні катоду відбувається з катодних плям, які переміщуються по поверхні катоду під впливом магнітного поля ачної конфігурації [3]. Катодні плями переміщуються зі швидкістю 50-100 м/с вздовж катоду і повертають у зворотному напрямку при досягненні кінця катоду. Одночасно магнітне поле обертається навколо осі катоду, в результаті чого трек переміщення катодних плям обертається навколо осі катоду, випаровуючи всю його поверхню.



а



б

Рис. 1. Катоди електродугових випарників металів:  
а – діаметром 60 мм, довжиною 250 мм, б - діаметром 57 мм, довжиною 1000 мм

Вакуумно-дугові покриття з хрому, танталу, молібдену та ніобію осаджувались в окремих дослідженнях на імітатор ствола та частини самого ствола [4-6]. Представлена технологія забезпечує адгезію покриття до поверхні ствола. Регулювання параметрами вакуумно-дугового осадження: напругою горіння дуги на катоді, довжиною пробігу катодних плям, величиною зміщення електричного потенціалу на стволі, додаванням активної газової суміші у вакуумне середовище камери здійснюється регулювання структурою і властивостями покриття з досягненням покращених результатів.

Отримані результати можуть бути використані при розробці промислової технології підвищення живучості гарматних стволів артилерійських стволів.

#### **Література:**

1. Надтока В. Н. Защитные покрытия для артиллерийских стволов. Артиллерийское и стрелковое вооружение, 2007, № 1, с. 34-42.
2. Василина В. Г., Зайцев В. И. Надтока В. Н. Экспериментальная установка для нанесения ионно-плазменных покрытий на внутреннюю поверхность труб. Вакуумная техника и технология. - 2006, т. 16 - № 1, с. 83-85.
3. Vacuum arc coatings for combustion chambers of rocket engines. Space Science and Technology. 2024. 30, No. 5 (150). p. 19-28.
4. Nadтока, V. N., Pankov, R. V. Stradomski, Z., Deyneko, I. M., Lytvynenko, O. Vacuum-arc chromium coatings for the protection of gun barrels. - Hutnik, Wiadomości Hutnicze, 2013, Vol. 80, № 5, p. 355-361.
5. Надтока В. М., Штапенко Е. П., Краєва В. С., Краєв М. В. Зміцнення сталей шляхом модифікації їхньої поверхні іонно-плазмовим азотуванням у жевріючому розряді. Космічна техніка. Ракетне озброєння. 2024, (1); 102-113. DOI: 10.33136/stma2024.01.102.
6. Zakiev, V.; Nadтока, V.; Zakiev, I.; Mordyuk, B.; Yakushenko, O.; Trofimov, I.; Skoryk, M.; Yutskevych, S. Micromechanical Properties and Tribological Performance of Mo, Cr, and Ta Coatings Obtained by Cathodic Arc-Deposition. Coatings 2025, 15, 358. <https://doi.org/10.3390/coatings15030358>.

Дослідження виконане за фінансовою підтримкою Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України» (проект № 2025.06/0084).

## ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕПЛОВОЗІВ

**Нерубацький В.П.**

*(УкрДУЗТ, м. Харків, Україна)*

Сучасні тепловози з асинхронним тяговим електроприводом характеризуються високим рівнем енергоефективності, надійності та експлуатаційної гнучкості. Застосування асинхронних електродвигунів у поєднанні з напівпровідниковими перетворювачами частоти та мікропроцесорними системами керування забезпечує покращення тягових характеристик і зниження витрат на обслуговування [1, 2]. Водночас ефективність експлуатації таких систем значною мірою визначається узгодженістю алгоритмів керування, параметрів силового перетворювача та фактичного технічного стану електропривода [3, 4]. Одним із перспективних напрямів розвитку є використання цифрових моделей асинхронного тягового електропривода, параметри яких можуть уточнюватися на основі експлуатаційних даних [5, 6]. Такі моделі здатні враховувати зміну електричних і теплових параметрів двигуна, вплив магнітного насичення та варіації режимів навантаження. Застосування подібних підходів створює передумови для більш точного відтворення поточного стану електропривода та використання результатів обробки експлуатаційних даних для корекції параметрів моделей і алгоритмів керування.

У складі систем керування тепловоза це відкриває можливість реалізації адаптивних алгоритмів, зокрема векторного керування з урахуванням зміни параметрів електродвигуна в процесі експлуатації. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільність електромагнітних процесів у широкому діапазоні режимів роботи, зменшувати додаткові втрати енергії та обмежувати теплові перевантаження, що безпосередньо впливає на ресурс обладнання.

Суттєвим резервом підвищення ефективності є вдосконалення методів діагностики технічного стану. Зокрема, аналіз струмів статора та їх спектральних характеристик дає змогу розпізнавати характерні ознаки дефектів елементів електродвигуна. У наукових дослідженнях також розглядається застосування методів інтелектуальної обробки сигналів для підвищення точності діагностики в умовах змінних режимів роботи та наявності завад.

Важливим аспектом є практична реалізація зазначених підходів у мікропроцесорних системах керування локомотива. Сучасний рівень розвитку обчислювальних засобів забезпечує можливість обробки експлуатаційних даних у реальному часі, що створює передумови для вдосконалення алгоритмів керування та діагностики без порушення вимог до швидкодії системи.

Таким чином, підвищення ефективності експлуатації асинхронних тягових електроприводів тепловозів пов'язане з розвитком підходів, що поєднують адаптивне керування, використання цифрових моделей та удосконалення методів аналізу експлуатаційних даних. Реалізація таких підходів сприяє зниженню енергетичних втрат, підвищенню надійності та оптимізації витрат на технічне обслуговування.

### **Література:**

1. Нерубацький В. П. Ініціювання реалізації прикладного дослідницького проекту з удосконалення енергоефективності тягових електричних двигунів локомотивів з урахуванням режимів функціонування тягових перетворювачів. Збірка наукових тез XIV наукової конференції «*Наукові підсумки 2025 року*» (Харків, 18 грудня 2025 р.). Харків: ПП «Технологічний Центр», 2025. С. 29.

2. Нерубацький В. П. Оптимізація частоти широтно-імпульсної модуляції автономного інвертора напруги за критерієм мінімуму додаткових втрат потужності в асинхронному електроприводі. Тези XIII міжнародної науково-технічної конференції «*Інформатика, управління та штучний інтелект (ІУШІ-2026)*» (Харків – Краматорськ – Хуст, НТУ «ХП» – ДДМА, 13–15 травня 2026 р.). Харків: НТУ «ХП», 2026. С. 89.

3. Нерубацький В. П. Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. Збірник матеріалів XI міжнародної науково-технічної конференції «*Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2025*» (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 18–20 листопада 2025 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.

4. Нерубацький В. П. Аналіз експлуатаційної надійності безколекторних тягових двигунів локомотивів. Тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції «*Прогресивні технології засобів транспорту*» (Харків, УкрДУЗТ, 03–04 грудня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 11–13.

5. Нерубацький В. П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення. Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «*Інтелектуальні транспортні технології*» (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 81–83.

6. Нерубацький В. П., Фалеев Ф. Р. Інноваційні технології штучного інтелекту в галузі електричного транспорту. Матеріали двадцять першої науково-практичної міжнародної конференції «*Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика*» (Харків, УкрДУЗТ, 5–6 червня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 351–354.

# ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИСОКОМІЦНОЇ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДОВАНИХ НАНОСИСТЕМ У ПОВОЄННУ РОЗБУДОВУ ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

<sup>1</sup>Нерубацький В.П., <sup>1</sup>Геворкян Е.С., <sup>1</sup>Комарова Г.Л., <sup>2</sup>Чишкала В.О.

(<sup>1</sup>УкрДУЗТ, м. Харків, Україна, <sup>2</sup>ХНУ імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна)

Сучасний етап розвитку важкого машинобудування України проходить в умовах безпрецедентних викликів, зумовлених необхідністю швидкого відновлення промислового потенціалу в повоєнний період. Процес масштабної відбудови зруйнованої інфраструктури, оновлення парку рухомого складу залізниць та відновлення потужностей металургійних і машинобудівних підприємств вимагає кардинального перегляду технологічних підходів. Основним пріоритетом стає інтенсифікація механічної обробки та перехід до використання важкооброблюваних матеріалів (високозагартовані сталі, чавуни, спецсплави), що є основою для виробництва надійних деталей машин.

Традиційні інструменти на основі вольфрамівмісних твердих сплавів у сучасних умовах часто вичерпують свій ресурс через дифузійне та термомеханічне зношування при високошвидкісному різанні. Для підприємств, задіяних у програмах повоєнного відновлення, критично важливим є впровадження інструментальних матеріалів, здатних ефективно працювати в режимах сухого різання (без застосування мастильно-охолоджувальних рідин), що забезпечує не лише екологічну безпечність, а й суттєве зниження виробничих витрат. У цьому контексті розвиток керамічних наноконсолідацій на основі оксиду алюмінію набуває особливого стратегічного значення як один із напрямів забезпечення технологічної незалежності вітчизняного машинобудування. Проте широке впровадження такої кераміки стримується її високою крихкістю та недостатньою тріщиностійкістю. Підвищення експлуатаційної надійності інструментальної кераміки можливе шляхом формування наноконсолідаційної структури за рахунок введення до матриці оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) монокарбїду вольфраму (WC) та використання енергоефективних методів швидкісної електроконсолідації, здатних забезпечити збереження нанорозмірної структури матеріалу [1, 2].

Для розробки ріжучих пластин підвищеної надійності використовувалися нанодисперсні порошки, отримані методом плазмохімічного синтезу (розмір частинок 0,06–0,07 мкм). Процес консолідації здійснювався методом

електроспікання (електроконсолідації) шляхом прямого пропускання електричного струму через графітову прес-форму [3, 4]. Застосування даного методу забезпечує інтенсивне нагрівання зі швидкістю до 250 °C/хв, що є визначальним чинником для мінімізації росту зерен, пригнічення рекристалізаційних процесів та стабілізації наноструктурного стану керамічного матеріалу.

Експериментально встановлено, що фізико-механічні характеристики нанокомпозита  $Al_2O_3-WC$  істотно залежать від параметрів термосилового циклу консолідації. Встановлено, що при температурі 1600 °C та тиску 50 МПа досягається максимальна щільність матеріалу (5,96 г/см<sup>3</sup>), що становить понад 99% від теоретичної. Це забезпечує високу твердість (93 HRA) та, що особливо важливо для ріжучого інструменту, підвищену в'язкість руйнування ( $K_{IC} = 5,8$  МПа·м<sup>1/2</sup>). Основні порівняльні характеристики розробленого матеріалу та серійних аналогів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики розробленого матеріалу та серійних аналогів

Матеріал \ Параметр	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Твердість, HRA	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	Стійкість $T$ , хв
ВОК-71 (промисловий еталон)	4,25	92	4,2	24
$Al_2O_3-WC$ (електроспікання)	5,96	93	5,8	33

Порівняльний аналіз показав, що розроблена кераміка характеризується підвищеною теплопровідністю порівняно з традиційними інструментальними матеріалами, що сприяє ефективному відведенню тепла із зони різання. Це є особливо актуальним при відновленні осей колісних пар та механічній обробці загартованих поверхонь рейок, де локальні перегриви можуть спричинити утворення мікротріщин і структурних дефектів у деталях. Результати експлуатаційних випробувань під час точіння сталі ШХ15 підтвердили стабільність роботи інструменту протягом 33 хвилин, що приблизно на 35% перевищує показники серійних керамічних аналогів.

Застосування розроблених нанокомпозитних пластин на підприємствах залізничної галузі та важкого машинобудування України дозволить:

- скоротити час чистової обробки деталей критичної інфраструктури у 1,5–2 рази;

– зменшити залежність від імпорتنих поставок дороговартісного ріжучого інструменту;

– забезпечити високу якість поверхні оброблених деталей (зниження шорсткості та дефектності поверхневого шару), що сприятиме підвищенню ресурсу експлуатації відновлених вузлів і механізмів;

– підвищити енергоефективність виробництва за рахунок використання швидкісних режимів електроконсолідації та скорочення тривалості технологічного циклу виготовлення інструменту.

Проведені дослідження підтверджують ефективність методу електроспікання для створення інструментальної кераміки нового покоління. Поєднання оксиду алюмінію та нанодисперсного карбиду вольфраму дозволяє отримати матеріал, який за своїми фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками відповідає вимогам сучасного високотехнологічного виробництва. Практичне впровадження розроблених нанокompозитів сприятиме підвищенню технологічної незалежності, конкурентоспроможності та виробничої стійкості промислового комплексу України в умовах повоєнної модернізації економіки.

#### **Література:**

1. Gevorkyan E., Rucki M., Krzysiak Z., Chishkala V., Zurowski W., Kucharczyk W., Barsamyan V., Nerubatskyi V., Mazur T., Morozow D., Siemiątkowski Z., Caban J. Analysis of the electroconsolidation process of fine-dispersed structures out of hot pressed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–WC nanopowders. *Materials*. 2021. Vol. 14, Iss. 21. 6503. <https://doi.org/10.3390/ma14216503>.

2. Hevorkian E., Samociuk W., Rucki M., Krzysiak Z., Pieniak D., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Lytovchenko S., Chalko L., Morozow D., Caban J., Kulich V. Microstructure and properties of binderless  $\mu$ WC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 20. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.

3. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Rucki M., Kilikevicius A., Mamalis A. G., Samociuk W., Morozow D. Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.

4. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Prokopiv M. M., Samociuk W., Mechnik V. A. Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗСПЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ТІЛІ ЗБІРНОГО РІЗЦЯ НА АМПЛІТУДУ ЙОГО АВТОКОЛИВАНЬ

Новіцький Ю.Я., Новіцький М. Я.

*НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)*

**Постановка проблеми.** Як відомо, коливання, що виникають в процесі різання, негативно впливають як на якість поверхні деталі, так і на стійкість інструмента та ресурс верстата. Ці коливання поділяють на вимушені коливання та автоколивання. Вимушені коливання збуджуються непостійним характером сил різання (розриви на поверхні оброблення), відцентровими силами (неврівноваженість деталей), періодичними силами, що передаються як від приводу верстата, так і від інших верстатів. Амплітуду цих коливань легко зменшують відходом від резонансу (змінюючи частоту обертання шпинделя) та віброізоляцією верстатів. Значно гіршою є проблема зменшення амплітуди автоколивань, основною причиною виникнення яких є неоднозначність характеристики сил різання [1]. Ця неоднозначність призводить до утворення петлі гістерезису, де одному і тому ж приросту товщини зрізу відповідають різні прирости сили різання при врізанні різці і його відштовхування. При відштовхуванні різець контактує із більш зміцненим (наклепанним) металом чим при врізанні, тому при відштовхуванні сила різання буде більшою чим при врізанні, при тому ж самому значенні товщини зрізу. Чим чутливішим до наклепу буде матеріал деталі, тим більшою буде сила, яка генерує автоколивання. І відбуваються ці коливання на власній частоті коливальної системи, тобто в резонансі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методи зменшення амплітуди автоколивань можна розбити на два класи – технологічні та конструкційні. До технологічних методів слід віднести такі як вибір відповідних режимів різання та кутів заточування інструмента [2]. До конструкційних – збільшення опору в коливальній системі та використання динамічних віброгасників [3;4], а враховуючи ту обставину, що автоколивання відбуваються в резонансі, де вплив згасання відіграє велике значення, збільшення опору в коливальній системі є не тільки вагомим фактором в зменшенні амплітуди автоколивань, але й фактором можливості їх виникнення взагалі, адже якщо енергія тертя буде більшою від енергії збудження, то автоколивання взагалі не виникатимуть [5].

**Формулювання мети дослідження.** Мета досліджень полягає в оцінці можливості використання сил сухого тертя в з'єднаннях елементів системи ВПД для зменшення амплітуди автоколивань.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** В даній роботі розглядається демпфер, дія якого ґрунтується на використанні сухого тертя, значення сили тертя якого не залежить від швидкості коливань (рис. 1). Тому він може бути ефективний на малих значеннях амплітуд і частот.

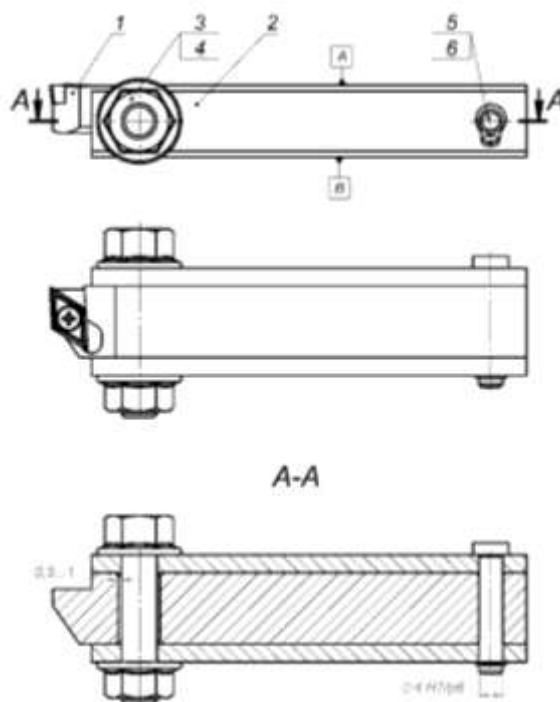


Рис. 1. Конструкція токарного різця із демпфером сухого тертя.

Демпфер складається із двох шліфованих пластин (2), які щільно закріплені в задній частині різця штифтом (5) та стопорним кільцем (6). Пластини (2) із різцем (1) закріплено болтовим з'єднанням (3,4). Між тілом різці і болтом виконано зазор, значенням 0,5 – 1 мм, внаслідок чого різець може переміщуватися у всіх трьох координатах без контакту з болтом. Сила тертя, яка виникає між різцем і пластинами регулюється затягуванням болта та гайки. Різець встановлюється в різцетримач супорта верстата площинами А та В. Висота різця дещо вища за висоту пластин (2 – 3 мм), що виключає контакт пластин із різцетримачем.

Експериментальні роботи по дослідженню демпфувальної здатності різця проводились на базі токарного верстата 16К20 (рис. 2) з використанням конструкції різця, подібного до представленого на рис. 1. Деталь – сталевий стержень  $\varnothing 50 \times 250$  мм встановлений в патрон консольно, що забезпечує добрі коливання системи. Стержень поділений канавками на окремі зони по 30 мм. Матеріал – сталь AISI 304. Режими різання: швидкість обертання шпинделя  $n=630$  об/хв; подача супорта  $s=0.2$  мм/об; глибина різання  $t=0.5$  мм. Такі параметри вибирались з метою отримання значних коливань.

Затяжка болта демпфера здійснювалася динамометричним ключем з діапазоном вимірювання крутного моменту 2 – 24 Нм. Точність  $\pm 4\%$ .

Використовувався болт М8 класу міцності 8.8. Максимальний момент затягування 24 Нм.

Менші від 2 Нм значення моменту встановлювались з допомогою електронного динамометра з діапазоном вимірювання 0 – 30 Н. Точність  $\pm 1\%$ .

Колівання вимірювались акселерометром ІС 598А та виводились на цифровий осцилограф DSO 4102С.

Експерименти з різними значеннями моментів затягування болта проводились на одній і тій же ділянці деталі.



Рис. 2. Експериментальні дослідження демпфувальної здатності різця із демпером сухого тертя

Результати вимірювань коливань різця при незатягнутому болтовому з'єднанні демфера різця приведені на рис. 3.

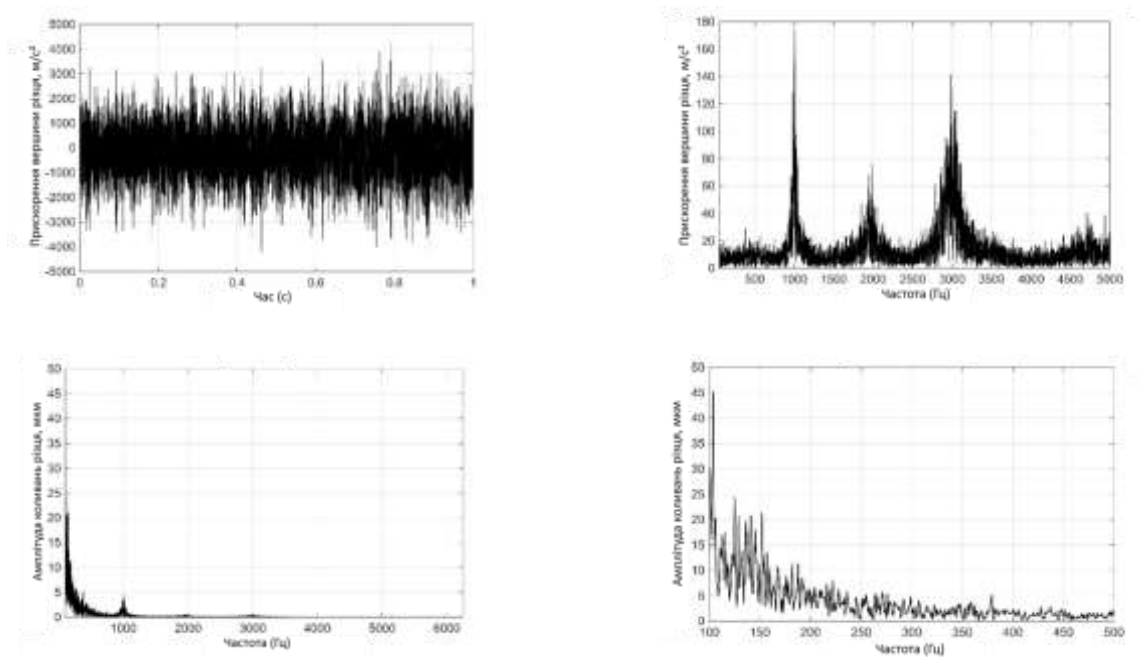


Рис. 3. Параметри експериментальних досліджень (а – сигнал із давача – прискорення; б – FFT перетворення сигналу; с – амплітудно-частотна характеристика сигналу; д – те ж тільки для діапазону 100–500 Гц)

Вихідний сигнал із давача коригувався з врахуванням його чутливості та відстані встановлення від вершини різця та защемлення різця в різцетримачі

супорта. Таким чином, сигнал на рис. 3,а характеризує прискорення вершини різця. Частота дискретизації сигналу становить 12,5 кГц, чого достатньо для належного відтворення сигналу частотою до 6,25 кГц. Верхній діапазон чутливості давача становить 10 кГц.

Після чого виконувалася процедура прямого перетворення Фур'є, в середовищі MATLAB, результат якої представлено на рис. 3,б.

Як видно із рисунка, коливання вершини різця носять полічастотний характер і мають яскраво виражені максимуми на частота близько 1000 Гц; 3000 Гц та 2000 Гц.

Для визначення амплітуди сигналу слід виконати його подвійне інтегрування, що легко виконати знаючи його конкретну частоту та зробивши припущення, що сигнал гармонійний.

Амплітудно-частотна характеристика сигналу (АЧХ) представлена на рис. 3,с. Як видно із рисунка, значення амплітуд зменшуються із збільшенням частоти.

На рис. 3,д представлено АЧХ сигналу в діапазоні високих значень амплітуд, а саме 100 – 500 Гц. Діапазон частот 10 – 100 Гц відфільтровано у зв'язку з низькою точністю давача та великою кількістю низькочастотних завад.

Оцінку інтенсивності коливань виконаємо за середнім значенням амплітуд в діапазоні 100 – 200 Гц, оскільки, як видно із рис. 3,д, це діапазон найвищих значень амплітуд. Середнє значення амплітуд коливань в цьому діапазоні становить 9.46 мкм.

На рис. 4 представлено результати експериментальних досліджень для випадку мінімальних та максимальних значень амплітуд коливань, отриманих при різних значеннях моменту затягування болтового з'єднання демпфера.

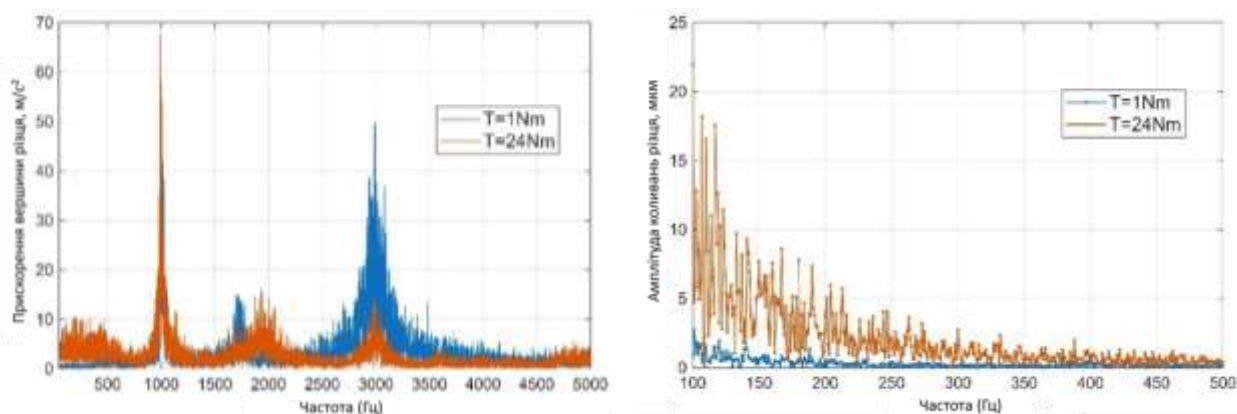


Рис. 4. Параметри експериментальних досліджень (а – FFT перетворення сигналу із різними значеннями сил тертя; б – амплітудно-частотна характеристика сигналу із різними значеннями сил тертя)

Як видно із рисунка 4,а збільшення сили тертя в демпфері призводить до зростання низькочастотних вібрацій та зменшення високочастотних і навпаки, зменшення сили тертя призводить до зменшення прискорень низькочастотних коливань і збільшення високочастотних. Так як амплітуди коливань із збільшенням частот – зменшуються (рис. 4,б), то використання демпфера сухого тертя є ефективним саме на низьких частотах коливань, чого немає в демпферах в'язкого тертя, де сила тертя пропорційна швидкості.

**Висновки.** Проведені експериментальні дослідження підтверджують можливість ефективного демпфування автоколивань у процесі точіння за рахунок використання демпфера сухого тертя. Встановлено, що зміна сили тертя в демпфері впливає на спектральний склад коливань: зі збільшенням сили тертя зростають низькочастотні складові та зменшуються високочастотні вібрації. З огляду на те, що найбільші амплітуди спостерігаються саме в низькочастотному діапазоні, використання демпфера сухого тертя є ефективним засобом підвищення динамічної стійкості системи ВПД.

Перевагами запропонованої конструкції є простота, надійність, низька вартість та можливість використання без суттєвих змін конструкції стандартного різального інструмента. Отримані результати можуть бути використані при подальшому вдосконаленні конструкцій різального інструмента з підвищеними демпфувальними властивостями.

#### **Література:**

1. Altintas Y. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Second edition / Y. Altintas // Cambridge University Press. – 2012
2. Novitskyi M., Novitskyi Y., Slipchuk A. The possibility of using structural damping in the design of a prefabricated turning cutter to reduce the amplitude of self-oscillations in the process of metal cutting // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2024. – Vol. 9, № 4 (2023). – P. 44–50.
3. Vnukov Y.M., Djadja S.I., Kuchuhurov M.V., Kondratyuk E.V. The device for self-excited vibrations researching in turning, Ukrainian Patent UA101906. (2015).
4. Vnukov Y.M., Kuchugurov M.V, Djadja S.I. and others: Method and device for researching the regenerative self-excited vibrations when turning / Cutting & Tool in technological system, International Scientific-Technical Collection, Kharkov, 2013. - Vol. 83, p.42-54.
5. Stupnytskyy V., Novitskyi Ya., Novitskyi Yu., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // Archive of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.

## ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КОРПУСНОЇ РЕАКТОРНОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Окіпний І.Б., Сенчишин В.С., Лазарюк В.В.**  
(ТНТУ імені І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна)

Відомо, що основними чинниками підвищення опору крихкому руйнуванню сталі типу 15Х2МФА корпусів атомних реакторів після попереднього термомеханічного навантаження (ПТН) є комплексний вплив затуплення вістря тріщини, залишкових напружень стиску та деформаційного зміцнення матеріалу у вістрі тріщини.

Розрахунки МСЕ виконували за допомогою програмного комплексу ANSYS. Для дослідження використовували компактні зразки, виготовлені зі сталі 15Х2МФА термообробка якої моделює механічні властивості після радіаційного опромінення на середину терміну експлуатації атомного реактора. При розбивці моделі використовували восьмивузловий двовимірний елемент Plane82, якому надали властивостей пластичності та великих деформацій.

Розрахунки проводили за умов плоскої деформації, враховували ефект Баушінгера та ефект кінематичного зміцнення матеріалу. У вістрі тріщини сітку елементів згущували для збільшення точності розрахунків. Мінімальний розмір елемента дорівнював 50 мкм, що приблизно дорівнює половині розміру зерна досліджуваної сталі. Зусилля прикладали до горизонтальної площадки половини отвору під захоплювач у вигляді еквівалентного зусилля тиску. Для адекватного відтворення поведінки матеріалу за різних температур і режимів навантаження використовували істинні експериментальні діаграми деформування матеріалу.

Досліджено МСЕ напружено – деформівний стан у вершині тріщини компактного зразка із сталі 15Х2МФА. Визначено розподіл нормальних напружень, залишкових стискувальних напружень та еквівалентних напружень за Мізесом після розвантаження у вістрі тріщини за статичного та комбінованого ПТН.

Встановлено, що за комбінованого ПТН, у порівнянні із ПТН, спостерігається істотніше зниження нормальних напружень та еквівалентних напружень за Мізесом спереду вістря тріщини при наступному навантаженні зразка при 20 °С за сталого КІН.

Виявлено, що криві розподілу еквівалентних напружень після ПТН, на відміну від первісного стану, мають ділянки зменшення і зростання напружень на деякій віддалі від вістря тріщини.

За результатами експериментальних досліджень і моделювання МСЕ запропоновано методику прогнозування впливу комбінованого ПТН на в'язкість руйнування теплостійкої сталі 15Х2МФА. Методика базується на аналізі напружено-деформованого стану МСЕ (у пружно-пластичній постановці) та критерії квазікрихкого руйнування – напруженні сколювання. Руйнування відбувається, коли на певній відстані від вершини тріщини нормальні напруження досягають напруження сколювання матеріалу. При розрахунку НДС у вістрі тріщини необхідно врахувати температурну зміну механічних властивостей сталі 15Х2МФА, ефект Баушінгера та кінематичне зміцнення матеріалу. Встановлено, що із зростанням рівня перевантаження комбінованим ПТН опір крихкому руйнуванню сталі 15Х2МФА зростає.

## ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ЛЕЗОВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ПЕРЕД АБРАЗИВНИМИ ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ ГАРТОВАНИХ ЗАГОТОВОК

**Оленюк Т.**

*(НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)*

Анотація. У тексті обґрунтовано доцільність заміни шліфувальних операцій на операції чистового фрезерування, точіння та розточування при фінішній обробці поверхонь у загартованих деталях. Показано, що сучасні верстати з ЧПК та надтверді інструментальні матеріали можуть забезпечити необхідну точність і якість поверхні. Такий підхід є особливо доцільним для одиничного й дрібносерійного виробництва, оскільки зменшує витрати, кількість установок і залежність від спеціалізованого обладнання та висококваліфікованого персоналу.

Ключові слова. Лезова обробка, шліфування, точність, чистове розточування, чистове точіння, чистове фрезерування.

Розвиток сучасних технологій та постійне зростання вимог до якості й довговічності машинобудівної продукції зумовлюють усе ширше використання загартованих сталей та інших високоміцних матеріалів. Такі матеріали характеризуються високою твердістю, зносостійкістю та здатністю працювати в умовах значних навантажень, тому вони активно застосовуються у виробництві деталей машин, штампового оснащення, прес-форм, валів, зубчастих коліс та інших відповідальних елементів конструкцій. У зв'язку з цим у машинобудуванні постійно ведеться пошук нових технологічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності обробки, зниження її собівартості та покращення експлуатаційних характеристик готових виробів.

Одним із найбільш ефективних напрямків удосконалення технологічних процесів є заміна традиційних методів абразивної обробки, зокрема шліфування, на методи лезової обробки — точіння, фрезерування та розточування. Розвиток сучасного металорізального обладнання, поява високошвидкісних верстатів з числовим програмним керуванням, а також використання надтвердих інструментальних матеріалів, таких як кубічний нітрид бору та твердосплавні пластини з покриттями, зробили можливим ефективну обробку загартованих сталей без застосування абразивних кругів.

Перехід до лезової обробки дозволяє суттєво скоротити машинний час виготовлення деталей. Це пояснюється тим, що за один прохід інструмент здатний знімати значно більший припуск, ніж при шліфуванні. Внаслідок цього зменшується кількість технологічних переходів та скорочується загальна тривалість виробничого циклу. Крім того, лезова обробка часто не потребує складного спеціалізованого обладнання, оскільки може виконуватись на універсальних токарних, фрезерних або багатоопераційних верстатах. Це знижує витрати на технологічне оснащення та обслуговування виробництва.

Важливою перевагою є й економічний аспект. Для лезової обробки зазвичай використовуються дешевші інструменти та оснащення порівняно з

високоточними шліфувальними системами. Також зменшуються витрати на охолоджувальні рідини, балансування шліфувальних кругів та їх періодичну заміну. Завдяки автоматизації сучасних верстатів роботу можуть виконувати оператори нижчої кваліфікації, що також позитивно впливає на собівартість продукції.

Суттєво покращуються й умови праці. Під час абразивної обробки утворюється значна кількість дрібнодисперсного абразивного пилю та металевих частинок, які негативно впливають на здоров'я працівників і можуть спричиняти прискорений знос обладнання. При використанні лезової обробки кількість таких шкідливих факторів значно менша, що покращує санітарно-гігієнічні умови у виробничих приміщеннях та підвищує екологічність технологічного процесу.

Ще однією важливою перевагою є менший тепловий вплив на поверхневий шар деталі. Під час шліфування температура в зоні різання може бути дуже високою, що іноді призводить до виникнення мікротріщин, припалів, внутрішніх напружень або зміни структури поверхневого шару металу. Лезова обробка, особливо при правильно підібраних режимах різання, дозволяє зменшити ризик появи таких дефектів і забезпечити стабільні показники якості поверхні.

Крім того, сучасні методи точіння та фрезерування забезпечують можливість комплексної обробки деталі за один установа. Це має велике значення для підвищення точності взаємного розташування поверхонь, оскільки виключаються додаткові похибки, пов'язані з повторним базуванням і перестановкою заготовки. Одночасно скорочуються допоміжні витрати часу на позиціонування деталі та налаштування обладнання, що позитивно впливає на загальну продуктивність виробництва.

Водночас абразивні методи обробки не втрачають своєї актуальності. Вони забезпечують дуже високу точність розмірів, мінімальну шорсткість поверхні та стабільну якість при обробці особливо твердих і складних матеріалів. Саме тому шліфування й надалі широко застосовується для фінішної обробки відповідальних деталей. Проте сучасні технології чистового точіння, фрезерування та розточування дедалі частіше успішно конкурують із традиційним шліфуванням і в багатьох випадках дозволяють повністю його замінити. Це сприяє підвищенню ефективності машинобудівного виробництва, скороченню витрат та покращенню техніко-економічних показників виготовлення деталей.

**Література:** 1. Ковальчук В. І. Технологія машинобудування : підручник. — Київ : Вища школа, 2018. — 512 с. 2. Мазур М. П., Внуков Ю. М., Доброскок В. Л. Основи теорії різання матеріалів : підручник. — Львів : Новий Світ-2000, 2019. — 422 с. 3. Клименко С. А., Мельничук П. П., Степаненко О. М. Інструменти з надтвердих матеріалів у машинобудуванні. — Житомир : ЖДТУ, 2017. — 364 с. 4. Trent E. M., Wright P. K. *Metal Cutting*. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. — 446 p. 5. Davim J. P. *Machining of Hard Materials*. — London : Springer, 2011. — 184 p. 6. König W., Klocke F. *Manufacturing Processes I: Cutting*. — Berlin : Springer, 2009. — 506 p. 7. Sandvik Coromant. *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*. — Sandviken : Sandvik Coromant, 2018. — 620 p.

# МІЦНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ЗАМКОВОЇ НАРІЗИ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ

**Онисько О.Р., Голик Т.Б.**

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, Україна)*

Міцність замкової різьби залежить від комплексу факторів, які можна розділити на три основні групи: геометрична точність, якість матеріалу та його обробки, а також умови складання й експлуатації [1].

## 1. Геометричні фактори та точність профілю

Навіть мікроскопічні відхилення в геометрії різьби можуть призвести до нерівномірного розподілу навантаження між витками, що викликає втомне руйнування [1].

- Крок різьби та його натяг: Невідповідність кроку конусної різьби ніпеля та муфти призводить до того, що працюють лише кілька витків (зазвичай перші або останні), замість усього з'єднання.

- Конусність: Похибки у конусності викликають або надмірне заклинювання у вузькій частині, або люфт, що знижує герметичність та міцність.

- Радіус закруглення западин витків: Западина витка різьби є головним концентратором напружень. Збільшення радіуса закруглення цієї западини значно підвищує втомну міцність з'єднання [2].

- Тип профілю різьби: Сучасні профілі (наприклад, з оптимізованими кутами нахилу фланців витків) краще чинять опір розтягуванню та стисненню, ніж застарілі трикутні чи трапецеїдальні форми.

## 2. Металургійні фактори та обробка поверхні

Матеріал, з якого виготовлено замок (зазвичай це високоміцні леговані сталі, наприклад, 40ХН, 40ХМФА тощо), безпосередньо визначає межу текучості та витривалості.

- Твердість та міцність сталі: Матеріал повинен мати високу в'язкість руйнування, щоб протистояти динамічним ударам, і достатню твердість проти зносу.

- Зміцнення різьби (наклеп): Обкатування западин різьби роликками або дробо-струминна обробка створюють у поверхневому шарі корисні залишкові напруження стиску. Це один із найефективніших способів підвищити втомну міцність (іноді в 1.5–2 рази).

- Антифрикційне покриття: Фосфатування або міднення різьби запобігає задирам (схоплюванню металу) під час згвинчування-розгвинчування та покращує утримання змазки [3].

## 3. Конструктивні особливості з'єднання

- **Наявність розвантажувальних елементів:** Обточування розвантажувальних канавок на ніпелі або муфті дозволяє прибрати пікові напруження з перших робочих витків різьби і перерозподілити їх по тілу замка.
- **Ефективність упорних торців:** У замкових з'єднаннях міцність забезпечується не лише самою різьбою, а й щільним приляганням упорних торців (або двох торців у дво-опорних замках). Вони сприймають більшу частину крутного моменту та захищають різьбу від перевантаження [4].

#### 4. Експлуатаційні та монтажні фактори

Якісно виготовлену різьбу можна легко зіпсувати на через людський або технічний фактор:

- **Крутний момент згвинчування (Tightening Torque):** *Недотягнення* призводить до розкриття стику під дією згинальних навантажень, що викликає швидке руйнування різьби або промив (протікання рідини). *Перетягнення* призводить до пластичної деформації (потечі) витків або розриву муфти.
- **Якість різьбової змазки:** Спеціальні змазки (найчастіше з додаванням цинкового або графітового порошку) зменшують тертя під час згвинчування, захищають від корозії та заїдання [5].
- **Корозійне середовище:** Буровий розчин (особливо сольовий або з вмістом сірководню ) викликає корозійне розтріскування під напругою.

Висновок: Максимальна міцність замкової різьби досягається тоді, коли ідеальна геометрія (мінімальні відхилення кроку й конуса) поєднується із поверхневим зміцненням (обкатуванням роликками) та контрольованим моментом затяжки на буровій.

#### Література:

1. Oleh Onysko, Volodymyr Kopei, Vitalii Panchuk, Ivan Ivaniv, Anatolii Verkalets. Problems of Lead Screw Accuracy made by turning. Automatics and control of processes, equipment, and plants, FEMА , 2024. *21-th international conference on Thermal Science and Engineering of Serbia. SimTerm Proceedings 2024.* Niš, Serbia Oct. 22-2 2024. pp. 270-274. doi: 10.5937/SimTerm242700, ISBN 978-86-6055-192-6
2. В.Б. Копей. Скінченно-елементний аналіз та оптимізація різьбових з'єднань. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування №58. 2010 витків: С. 42-47.
3. Чернова М.Є. Полімерно-композиційні матеріали для елементів бурильної колони. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 1(46). С.153-161.
4. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Копей В. Б. Моделювання різьб насосних штанг методом скінченних елементів. *Науковий вісник Івано-Франківського Національного технічного університету.* 2009. № 2. С. 61–68.
5. Pablo Adrián Castro; Walter Roberto Tuckart; Nicolás Ariel Zabala. Tribological behavior of thread compound for applications in oil and gas industry, p. 3760-3771. In: *2nd International Brazilian Conference on Tribology*, Foz do Iguaçu - Brasil, 2014, p 108-119. DOI [10.5151/1472-5836-25387](https://doi.org/10.5151/1472-5836-25387)

## ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ

<sup>1</sup>Онищук С.Г., <sup>2</sup>Тулупов В.І.

(<sup>1</sup>ДДМА, м. Краматорськ, Україна; <sup>2</sup>Краматорський фаховий коледж технологій та дизайну, м. Краматорськ – Черкаси, Україна)

Випуск продукції відповідної якості є одним з головних завдання машинобудівної галузі. В процесі виготовлення деталей машин використовуються різноманітні методи, що суттєво впливають на експлуатаційні властивості функціональних поверхонь протягом життєвого циклу.

В машинобудуванні використовують зміцнювальні методи обробки виробів, серед яких останнім часом набули поширення комбіновані методи. До комбінованих зміцнювальних методів з модифікацією поверхні виробу належать зокрема такі: хімічні та хіміко-термічні (цементування, азотування, нітроцементация), термічні (гартування струмами високої частоти), обробка виробів концентрованими потоками енергії (пучки електронів, плазмові потоки, лазерне випромінювання), механічні (поверхнево-пластичне деформування) та ін [1].

Метою роботи є вивчення технологічних можливостей енергозберігаючих технологій в машинобудуванні.

Використання комбінованих зміцнювальних методів потребує використання додаткових джерел енергії. Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур. Найменші витрати енергії спостерігаються при застосуванні електричних джерел тепла, а найбільші – плазмово-механічних і лазерно-механічних [2].

Електроімпульсне вигладжування – високоефективна технологія поверхневого зміцнення концентрованими потоками енергії, заснована на комплексному термодформаційному впливі при пропусканні електричного струму великої щільності ( $108-109 \text{ A/m}^2$ ) та низької напруги (2-6 В) через зону контакту деталі і деформуючого електрода-інструменту (індентора), що рухаються у взаємоперпендикулярних напрямках зі швидкістю  $V$  та подачею  $S$ .

При цьому в результаті виділення великої кількості джоулевого тепла відбувається високошвидкісне ( $106 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ) нагрівання локального мікрооб'єму поверхні з одночасним її пластичним деформуванням і подальше інтенсивне охолодження ( $105 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ) за рахунок відведення тепла вглиб металу. В результаті потужного теплового «удару» на поверхні матеріалу формується зміцнений «білий шар» – унікальна мартенситна структура (гарденіт, наноструктурний мартенсит), що має високу міцність і зносостійкість [3].

Застосовуючи електроімпульсне вигладжування, можна отримувати деталі з високими експлуатаційними властивостями в поверхневих шарах внаслідок невеликої шорсткості поверхні та механічного зміцнення.

Електроімпульсне вигладжування проведено на зразках зі сталі 40ХН. Дослідження мікротвердості поверхневого шару виконувалось з використанням приладу ПМТ-5. За результатами досліджень побудовано графіки (рис. 1).

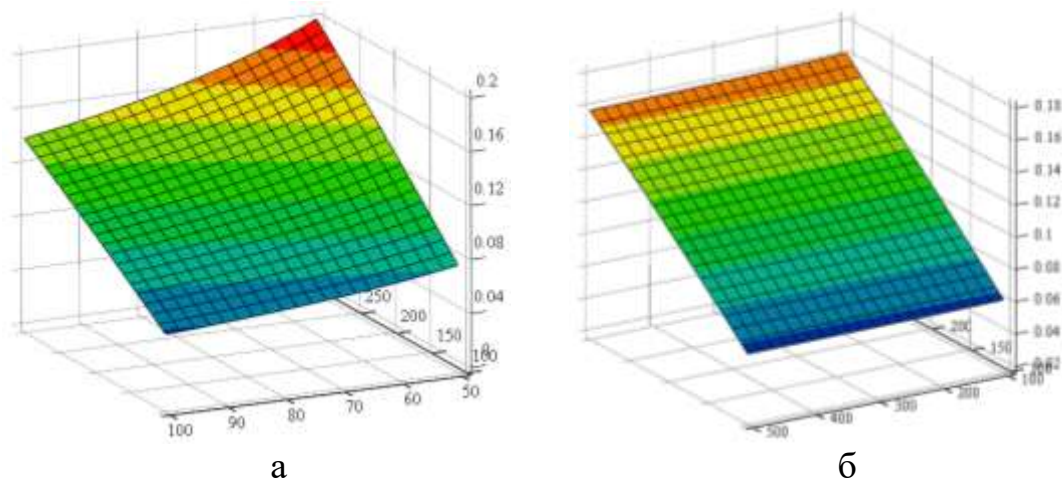


Рис. 1. Вплив сили імпульсного струму та швидкості різання (а), сили імпульсного струму та частоти струму (б) на глибину зміцнення

Мікротвердість поверхні після електроімпульсного вигладжування змінювалась в межах 3,4...5,9 ГПа, залежно від режимів оброблення, при початковій мікротвердості поверхні деталі 2...2,12 ГПа.

Випробування на зносостійкість виконано на устаткуванні за методикою випробувань на машині тертя за схемою «диск-колодка» [4]. Результати досліджень свідчать про те, що зносостійкість поверхонь збільшується в 1,8–2,2 рази, інтенсивність зношення зменшується в 1,5–1,9 рази.

Використання імпульсного електричного струму при електроімпульсному вигладжуванні призводить до зменшення витрат енергії як в процесі виконання операції, так й за рахунок виключення термічної операції.

**Висновок:** використання комбінованих методів зміцнення, зокрема електроімпульсного вигладжування, дозволяє забезпечити експлуатаційні властивості функціональних поверхонь, зменшити енергоємність та тривалість виробничого процесу.

**Література.** 1. Серeda Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія. Запоріжжя: ЗДА, 2004. 230 с. 2. Ковалевський С. В., Тулупов В. І. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин: монографія. Краматорськ: ДДМА, 2012. 100 с. 3. Дослідний лабораторний практикум : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 «Прикладна механіка» з курсів «Технологія функціональних та наноповерхонь», «Спецкурс за напрямком магістерської роботи» / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук. Краматорськ–Тернопіль: ДДМА, 2023. 140 с. 4. Пилипченко О.В., Луцак Л.Д., Бурда М.Й., Грушецький М.В. Оптимізація методики дослідження зносостійкості під час тертя із закріпленим абразивом матеріалів, отриманих методом СВ-синтезу // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. 2010. № 2(35). С.50-53.

## ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІЮ ФІШЕРА ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

**Петрухін Я.І., Суботін О.В.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Модернізація систем керування або регулювання, як правило, базується на даних їх дослідження. Але кількість регульованих параметрів системи та їх взаємний вплив один на одного не завжди можна врахувати в розробленій моделі об'єкту або процесу, що прямо впливає на результати теоретичних досліджень і якість модернізації. Тому оцінка достовірності отриманих результатів при дослідженні моделі контрольованого об'єкту або процесу є актуальною задачею.

Як правило, результати моделювання або розрахунків можна порівняти з величиною параметрів працюючої системи або пристрою. Але при аналізі процесів або об'єктів автоматизації, де прямий доступ до них відсутній, моделювання залишається основним джерелом інформації про їх можливу поведінку в умовах дії збурень або керуючих впливів.

Проведений аналіз можливості перевірки моделі на адекватність шляхом оцінки її результатів моделювання на достовірність з використанням критерію Фішера [1].

Досліджувалась модель системи автоматичного регулювання тиску в магістральному трубопроводі з можливістю знаходити ймовірні витіки. Для перевірки адекватності моделі системи застосовано F-критерій Фішера, відповідно якого причини існування випадкової помилки можуть бути:

- відсутність в моделі значущих параметрів;
- об'єднання дії деяких параметрів;
- помилки в структурній схемі моделі;
- помилки або неточність інтерпретації елементів системи певними функціональними блоками;
- помилки вимірювання значень параметрів системи.

Проведено дослідження моделі та проведено розрахунок критерію для одного значущого параметра – тиску рідини в трубопроводі в залежності від подачі насоса [2].

Зрозуміло, що відхилення для окремого спостереження є випадковими, а їх значення у загальній вибірці невідомі. Через це треба вводити додаткові обмеження на оцінки спостережень параметрів та оцінки самих параметрів регресійної моделі.

Для оцінки спостережень параметрів використовують метод найменших квадратів, який далі дозволяє отримати ефективні і незсунені оцінки параметрів

рівняння регресії [3].

Перевірка значущості моделі регресії проводиться з використанням F-критерію Фішера, розрахункове значення якого знаходиться як відношення дисперсії вихідного ряду спостережень досліджуваного параметру і незміщеної оцінки дисперсії залишкової послідовності для певної моделі [4].

Оцінка статистичної значущості парної лінійної регресії проводиться за методикою, що передбачає наступний алгоритм дій [5, 6]:

- висувається нульова гіпотеза про те, що рівняння в цілому статистично незначуще;

- визначається фактичне значення F-критерію і порівнюється з табличним для певних розрахунків.

Відповідно методики, якщо розрахункове значення критерію більше табличного для певних умов експерименту, то нульова гіпотеза відхиляється і приймається альтернативна гіпотеза про статистичну значущість рівняння в цілому.

Встановлено, що в досліджуваній моделі системи регулювання тиску рідини в трубопроводі загальна варіабельність значущого параметру (тиск рідини в трубопроводі) перебільшила 96 % за рахунок зміни вхідної величини (подача насосу). Це доводить те, що такі результати моделювання можна вважати достовірними, а модель системи – адекватною відтвореною.

Результати дослідження доводять можливість застосування критерію Фішера для оцінки значущості отриманих результатів моделювання об'єкту, системи або процесу, що дозволяє попередньо визначити адекватність досліджуваної моделі.

#### **Література:**

1. Сачанюк-Кавецька, Н., Кавецький, В. (2021). Застосування критерію Фішера для забезпечення достовірності результатів оцінювання залишкових знань студентів. Фізико-математична освіта, 28(2), 71–76. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2021-028-2-012>;
2. Суботін, О.В., Койфман, О.О., Сімкін, О.І., Антіпов, М.М. (2026) Удосконалення системи регулювання тиску в магістральному трубопроводі. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Технічні науки, 6, 58-64. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6>;
3. Джунь Й. В. (2014). Про метод найменших квадратів, адаптований до закону похибок Пірсона-Джеффра. Геодезія, картографія і аерофотознімання (ISTCGCAP), 79, 68 – 73;
4. Аарон Малишко. (2026) Для чого потрібен критерій Фішера: основні застосування і значення. Notatka. URL: <https://notatka.com.ua/instrukcii/dlia-chogo-potriben-kriterii-fishera-osnovni-zastosuvannia-i-znachennia>;
5. Левко Черинько. (2026). F-критерій Фішера в Excel: пояснення поняття, особливості та застосування. URL: <https://notatka.com.ua/instrukcii/f-kriterii-fishera-v-programi-excel-zastosuvannia-i-rozrakhunki>;
6. (2024). Fisher's Exact Test: A Comprehensive Guide. Learn Statistics Easily. URL: <https://statisticseasily.com/fishers-exact-test>.

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

**Пожидаєв А. В., Бережна О. В.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

Металургійна галузь України займає вагоме місце у формуванні таких макроекономічних показників, як ВВП і валютні надходження, що сприяє зміцненню національної валюти та, як наслідок, підвищенню фінансової стабільності держави й добробуту населення.

У сучасних умовах розширення асортименту продукції та підвищення вимог до її якості особливої актуальності набуває розвиток технологій і обладнання для обробки листового прокату в металургійній галузі з метою задоволення потреб споживачів.

Сучасні правильні машини мають низку недоліків, зокрема виконують лише окремі технологічні операції, залишають простір для впливу людського чинника під час керування агрегатом, допускають релаксацію напружень у проміжку часу між правкою та різанням [1], а також потребують значної кількості обслуговувального персоналу.

Нове покоління обладнання правильно-різальних комплексів позбавлене зазначених недоліків. Розвиток правильно-різальних комплексів та листоправильних машин відбувається переважно в напрямках діджиталізації, математичного моделювання знакозмінних деформацій та впровадження систем штучного інтелекту для автоматичного налаштування. Увесь технологічний цикл у таких комплексах об'єднано в єдину автоматизовану систему [2], а процеси розмотування, вирівнювання, поздовжнього й поперечного розкрою та штабелювання відбуваються безперервно за один прохід на швидкостях до 40–120 м/хв.

Комплекс оснащено єдиною системою ЧПУ, енкодерами та стежними сервоприводами. Синхронізація правильних роликів із «летючими ножицями» або високошвидкісними гільйотинами забезпечує точність довжини готового листа до часток міліметра (0,2–0,5 мм). Розкрій здійснюється одразу після зняття напружень у правильному вузлі, тому метал не встигає деформуватися, що унеможливорює серповидність смуг і крайову хвилястість. Усю лінію обслуговує один оператор з пульта керування, а система ЧПУ автоматично розраховує оптимальну карту розкрою рулону, мінімізуючи торцеві обрізки та відходи металу.

Комплекс оснащено сучасними промисловими контролерами, інтегрованими в загальну MES-систему заводу. Він отримує виробничі завдання безпосередньо від інженерного відділу, автоматично переналаштовує зазори

роликів відповідно до товщини сталі та формує звіти про обсяги нарізаного металу в режимі реального часу.

Незважаючи на високу ефективність, сучасні правильно-різальні комплекси мають низку конструктивних, технологічних та експлуатаційних проблем, зокрема потребують значних капітальних інвестицій і витрат на технічне обслуговування, а також характеризуються складністю переналагодження лінії на новий тип розкрою. Додаткові труднощі виникають під час обробки металу, оскільки рулони однієї марки сталі, але з різних партій, можуть відрізнятися межею текучості та мати різнотовщинність, унаслідок чого автоматичні налаштування не завжди спрацьовують коректно.

Для розв'язання цієї проблеми Sebastian Mróz у роботі [2] пропонує оснащувати комплекс адаптивним лазерним сканером площинності. Вимірювання геометрії листового металу за допомогою 3D-сканера дало змогу розробити його геометричні моделі, які надалі були використані для чисельного моделювання процесу правки на п'ятивалковому попередньому вирівнювальному пристрої.

Eduard Gribkov у роботі [3] застосував чисельну аналітичну математичну модель процесу, що дає змогу визначати енерго-силові характеристики та кривизну листа після правки залежно від індивідуальних налаштувань роликів правильної машини. У межах цього дослідження було розроблено алгоритм математичної моделі, який дає змогу визначати необхідні технологічні налаштування правки для корекції поздовжньої кривизни.

Перспективи розвитку правильно-різальних комплексів пов'язані з упровадженням штучного інтелекту (AI) для створення самонавчальних виробничих ліній, а також із розробленням роботизованих станцій заміни блоків ножів.

#### **Література:**

1. Guodong Y., Liang Y., Wang C., Xu J. Residual stress measurement methods and application // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 22. Art. 4975. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9224975>.
2. Mróz S., Szota P., Garstka T., Stradomski G., Gróbarczyk J., Gryczkowski R. The selection of leveler parameters using FEM simulation // Materials. 2024. Vol. 17, No. 1. Art. 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17010052>.
3. Gribkov E. P., Kovalenko A. K., Hurkovskaya S. S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities [Електронний ресурс]. 2021. Режим доступу: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-655629/v1> (дата звернення: 30.05.2026).

# ДІАГНОСТУВАННЯ РОЗВИТКУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ РОТОРА ДЖЕФКОТА МЕТОДОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЮ ЧАСТИНОК

**Рощупкін О. В., Павленко І. В.**

*(Сумський державний університет, м. Суми, Україна)*

У роботі пропонується спосіб оцінювання відносної глибини тріщини і коефіцієнтів жорсткості та демпфування ротора Джефкота, пошкодженого унаслідок розвитку тріщини, на основі оптимізаційного PSO-алгоритму (від англ. *particle swarm optimization* – оптимізація методом рою частинок) для неявних аналітичних залежностей між ключовими діагностичними ознаками у складі цільової функції [1, 2].

PSO-підхід є евристичним методом глобальної оптимізації, який не вимагає умови диференційованості цільової функції, є відносно стійким до наявності локальних мінімумів та добре зарекомендованим до розв’язання задач оцінювання параметрів з неявними та напівемпіричними залежностями.

З огляду на очевидну небезпеку проведення натурних випробувань пошкодженого ротора, для отримання статистичних даних, необхідних для аналізу, пропонується використовувати цифровий двійник ротора [3].

Як ключові діагностичні ознаки наявності тріщини обрано зсув частоти основного резонансу пошкодженого ротора, виражена друга гармоніка на фазі розгону та розширення піка основного резонансу на рівні  $-3$  дБ.

Під час проведення числових експериментів із цифровим двійником отримано напівемпіричну залежність для оцінювання відносної глибини тріщини  $\chi$  через амплітуду резонансу другої гармоніки, яка використовується в цільовій функції алгоритму:

$$\chi = \left( \frac{4\zeta A_{2\chi}}{0.3e} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

де  $A_{2\chi}$  – амплітуда резонансу другої гармоніки, м;  $\zeta$  – безрозмірний коефіцієнт демпфування;  $e$  – ексцентриситет, м.

Інший вираз, що описує зв’язок параметрів, визначає зсув першої критичної частоти, спричинений зниженням ефективної жорсткості при розкритті тріщини:

$$\delta\Omega = \frac{0.6}{K} \chi^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

де  $K$  – зведений коефіцієнт жорсткості, Н/м.

Проте, пряме аналітичне оцінювання зсуву ускладнене з огляду на відсутність достовірної інформації щодо значення жорсткості. Водночас, використання значень жорсткості зі скінченноелементної моделі розриває зв’язок між цифровим двійником та реальним ротором. Тому як компроміс замість значення жорсткості пропонується використовувати значення власної

частоти пошкодженого ротора  $\omega_{0h}$  за припущення, що власна частота нормального та пошкодженого роторів відрізняються несуттєво. У свою чергу, значення власної частоти непошкодженого ротора та частота першого резонансу пов'язані через жорсткість.

Амплітуду  $A_{2x}$  пошкодженого ротора для виразу (1) можна визначити за допомогою аналізу спектрограми розгону. Значення ексцентриситету визначається як допустимий залишковий ексцентриситет за ISO 1940-1:2003 «Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part 1: Specification and verification of balance tolerances».

Ураховуючи вищесказане та залежності (1), (2) маємо неявну залежність вимірних та синтезованих даних, яку можна використати для цільової функції PSO-методу:

$$J(\chi, \zeta, K) = \sum_{i=1}^n w_i r_i^2, \quad (3)$$

де  $n$  – загальна кількість ознак;  $i$  – номер ознаки;  $r_i$  – нормоване значення відхилення певної ознаки;  $w_i$  – коефіцієнт впливу  $i$ -ої ознаки на загальний функціонал.

Ця цільова функція є зваженою сумою квадратів нормованих відхилень вимірних величин та величин, обрахованих за допомогою аналітичних залежностей. Вона мінімізується шляхом послідовного коригування оцінюваних параметрів.

Порівнюючи запропонований метод із іншими методами оптимізації, можна зазначити що, на відміну від нелінійного методу найменших квадратів, PSO-метод не вимагає диференційованості аналітичних залежностей для їх мінімізації. Крім того, метод не потребує навчання, необхідного для роботи інших, нейромережових підходів. Проте, варто зазначити, що PSO-підхід відносно чутливий до правильного вибору початкових значень та помітно повільніший за інші вищезазначені підходи.

У цілому, якість оцінювання параметрів за допомогою запропонованого метода залежить від відповідності цифрового двійника реальній системі, в якій наявні невраховані фактори та приховані механізми їх взаємодії. Водночас, використання евристичних підходів у поєднанні із синтетичними даними залишається перспективним та безпечним інструментом для діагностування роторних систем та розв'язання широкого кола науково-прикладних задач.

#### Література:

1. Roshchupkin O., Pavlenko I. Modern methods for diagnosing faults in rotor systems: A comprehensive review and prospects for AI-based expert systems // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15(11). – Art. no. 5998. <https://doi.org/10.3390/app15115998>
2. Kumar P., Tiwari R. (2024). Additive fault diagnosis techniques in rotor systems: A state-of-the-art review. Sādhanā, Vol. 49, Art. no. 207. <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02543-7>
3. Рошчупкін О. В. Цифровий двійник ротора Джефкота з поперечною тріщиною / О. В. Рошчупкін, І. В. Павленко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2026 р.) / редкол. : О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2026. – 255 с. – С. 84–85.

## МОДЕЛЮВАННЯ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДШИПНИКІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА CAD/FEM-АНАЛІЗУ

**Сорока М. О., Віштак І. В.**  
(ВНТУ, м. Вінниця, Україна)

Сучасний розвиток машинобудування характеризується активним впровадженням цифрових технологій проектування та адитивного виробництва, що відкриває нові можливості для створення високоефективних конструкцій вузлів тертя. Підшипники як ключові елементи механічних систем визначають надійність, довговічність і енергоефективність машин та транспортних засобів. Традиційні методи їх виготовлення обмежують можливість реалізації складної геометрії та оптимізації внутрішніх структур. В цьому контексті застосування CAD/CAE-систем і методів чисельного аналізу (зокрема FEM) у поєднанні з адитивними технологіями дозволяє створювати підшипники нових конструкцій із покращеними експлуатаційними характеристиками, адаптованими до специфічних умов роботи.

Метою роботи є дослідження нових конструкцій підшипників із використанням адитивних технологій на основі тривимірного моделювання та аналізу напружено-деформованого стану засобами CAD/FEM-інструментів.

У роботі досліджено тривимірні моделі підшипників нової конструкції з урахуванням можливостей адитивного виробництва, що дозволяє реалізувати складні внутрішні канали змазування та оптимізовану геометрію контактних поверхонь [1-4]. Проведений аналіз напружено-деформованого стану із застосуванням методу скінченних елементів показав, що запропоновані конструктивні рішення забезпечують більш рівномірний розподіл навантажень у зоні контакту та зниження пікових напружень у порівнянні з традиційними аналогами [4,5].

Встановлено, що використання полімерних та композиційних матеріалів у поєднанні з адитивними технологіями сприяє зменшенню маси виробу та підвищенню демпфувальних властивостей, що є особливо важливим для зниження вібрацій і шуму в транспортних системах [5,6]. Крім того, застосування CAD/FEM-аналізу на етапі проектування дозволяє скоротити

кількість експериментальних випробувань і підвищити ефективність інженерних рішень [2,3].

У результаті проведеного дослідження підтверджено ефективність застосування адитивних технологій у поєднанні з CAD/FEM-моделюванням для розробки підшипників нових конструкцій. Запропонований підхід забезпечує можливість створення виробів зі складною геометрією, оптимізованими експлуатаційними характеристиками та підвищеною надійністю [3,4].

Отримані результати свідчать, що інтеграція цифрового проектування та сучасних технологій формоутворення є перспективним напрямом розвитку машинобудування. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію отриманих результатів, удосконалення матеріалів для адитивного виробництва та розробку інтелектуальних методів оптимізації конструкцій підшипників з урахуванням реальних умов експлуатації.

#### **Література:**

1. Ben Said L., Ayadi B., Alharbi S., Dammak F. Recent advances in additive manufacturing: a review of current developments and future directions // *Machines*. 2025. Vol. 13, No. 9. Art. 813. DOI: 10.3390/machines13090813.
2. Sheikh T., Behdian K. Geometric void-multiscale model for evaluating the effect of bead width and layer height on voids in FDM parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29, No. 8. P. 1565–1579. DOI: 10.1108/RPJ-01-2023-0013.
3. Falkowski P., Leczkowski B. The design of 3D-printed open bearings for human assisting robots // *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2025. DOI: 10.14313/jamris-2025-021.
4. Doğan B. K., Karaçay T. An investigation of service life behavior of 3D-printed hybrid polymer bearing using fused deposition modeling (FDM) method // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2025. Vol. 239, No. 11. P. 4143–4151. DOI: 10.1177/09544062251316765.
5. Ağören G., Dal A., Karaçay T. Design and performance evaluation of a 3D printed aerostatic bearing concept with high number of micro-orifices // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2025. Vol. 239, No. 4. P. 509–524. DOI: 10.1177/13506501241295824.
6. Moldovan C., Sticlaru C. Performance analysis of polymer additive manufactured gear bearings // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 22. Art. 12383. DOI: 10.3390/app132212383.

## ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

Стецько А.Є.

(НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

Сучасні машини і агрегати працюють в умовах високих швидкісно-навантажувальних факторів. Щодо обладнання прецизійного і складного за конструкцією, можна вести мову про низку деталей, які нами відносяться до класу так званих “швидкозношуваних”. В основному – це пари тертя. Відповідно виникає проблема їх частотої заміни, а отже – незручності у обслуговуванні та падіння як якості друку (через порушення кінематичної точності ланок), так і продуктивності обладнання.

Вирішення проблеми зміцнення поверхневих шарів цих деталей лежить у площині створення так званих композитних покриттів, яким одночасно притаманні висока зносостійкість (завдяки твердій фазі) та значна в'язкість. Остання функція забезпечується пластичною матрицею, у якій релаксуються знакозмінні напруги, які виникають на поверхні, наприклад, в результаті реверсивного тертя.

Відомо, що в результаті дифузійного хромування вуглецевих сталей на поверхні формується зовнішній суцільний шар карбідів хрому товщиною до 20 мкм. Невелика товщина карбідної фази, а також наявність підповерхневої знеуглецьованої зони є обмежуючим фактором щодо працездатності даного покриття при вищевказаних умовах експлуатації.

**Мета досліджень.** Дослідити зміцнені композитні шари, отримані комплексним способом для важконавантажених деталей машин.

Виклад основного матеріалу. Застосування попереднього хімічного осадження (Ni-Co-P) є причиною формування композиційного покриття, бо, імовірно, при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  реалізується явище рідкометалевої фази (PM-фаза), яке прискорює дифузію хрому і забезпечує утворення первинної зони твердого розчину Cr в  $\alpha\text{-Fe}$  [1], [2], [3]. Ізотермічна витримка дає можливість збільшити глибину цієї зони. Наявність у ХП фосфору призводить до утворення карбідної складової у вигляді стовпчатих зерен або колонії зерен довільної морфології.

Проведення дослідження розподілу дифузантив на мікроаналізаторі “Comeбах” та металографічний аналіз дозволяють зробити наступні висновки, щодо закономірностей структуроутворення.

Задля визначення впливу на кінетику формування дифузійного шару вуглецю було проведене хромування сталі У10 при  $\tau = 7$  год з ізотермічною витримкою  $\tau = 1$  год. при  $T = 800^{\circ}\text{C}$ . Мікроструктура подана на рис. 1. Товщина композиційної зони 1 становить 200-220 мкм. Причому, як видно з мікрофотографії, сама композитна зона складається з двох підзон, кожна з яких характерна будовою карбідної колонії. Перша підзона 1.1 є конгломератом невеликих карбідних зерен витягнутої форми (“рисова” структура), як наслідок зрощування між собою пакетів мікрозерен. Друга підзона 1.2 – практично суцільний шар карбиду хрому (теж після злиття мікрозерен).

Аналіз розподілу концентрацій (рис. 2) показує: по-перше, в композитній зоні рівень концентрації хрому в підзоні 1.1 та 1.2 не однаковий, що говорить, про різну природу карбідів хрому (в підзоні 1.1 –  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , а в підзоні 1.2 –  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ); по-друге, розподіл Ni та Co в композитній зоні піків не дає за винятком підзони 1.2, де ці дифузанти явно витісняються суцільним зерном карбиду. Натомість спостерігається ще вищий пік в зоні 2 гомогенного твердого розчину Cr в  $\alpha$ -Fe. По-третє, наявні сплески концентрації фосфору в підзоні 1.1 і різке падіння останньої, починаючи від підзони 1.2 і на глибину.

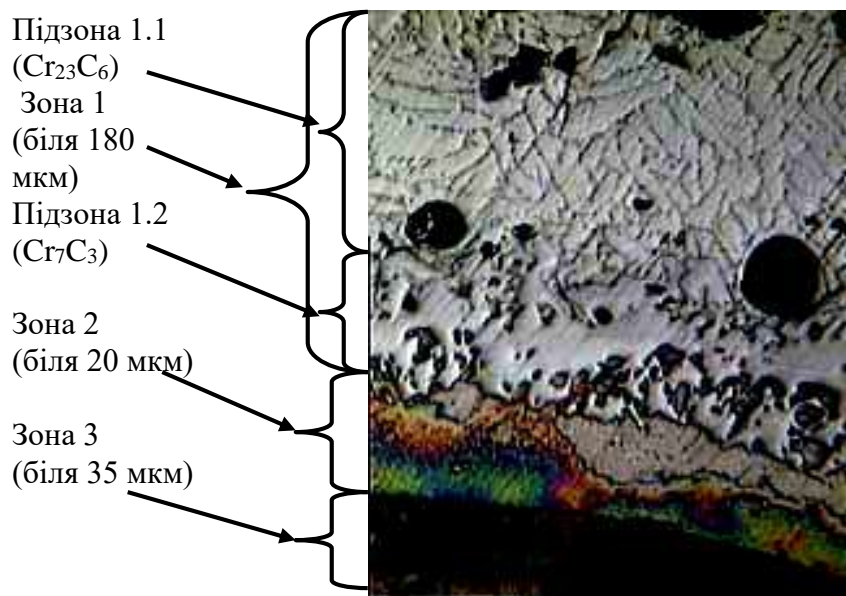


Рис.1.  
Мікроструктура дифузійного шару на сталі У10 з попереднім Ni-Co-P покриттям. Режими:  $T=1050^{\circ}\text{C}$ , витримка  $\tau=7$  год (попередня ізотермічна витримка  $\tau=1$  год. при  $T=800^{\circ}\text{C}$ ).

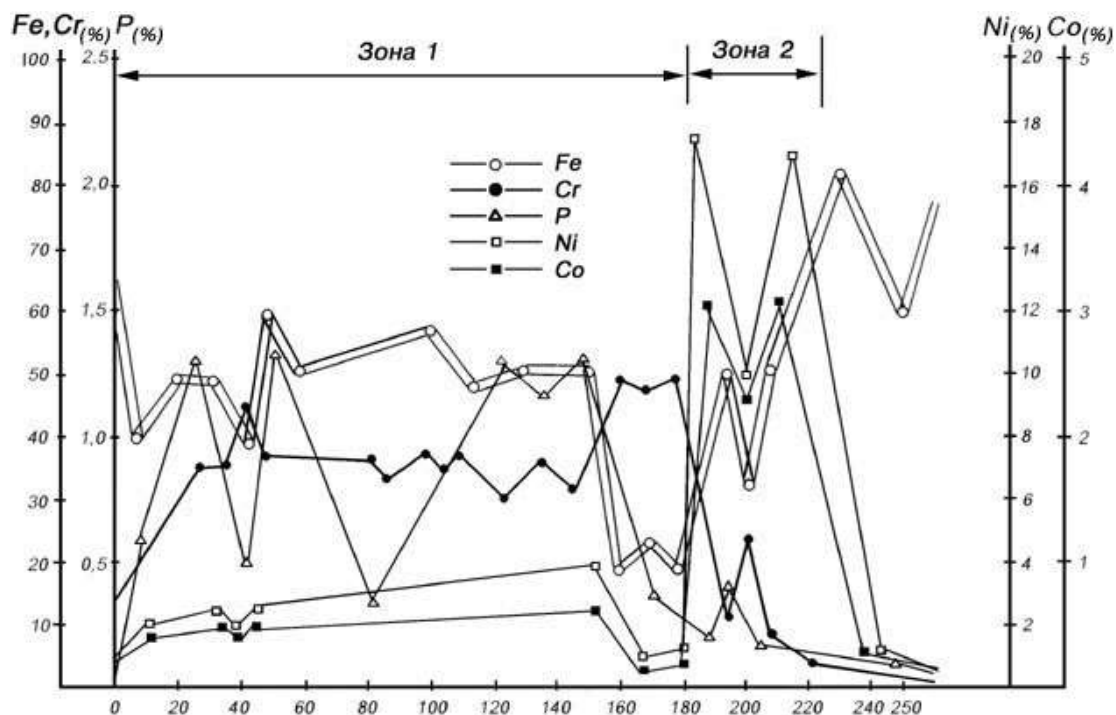


Рис. 2. Графік розподілу концентрації дифузійних елементів.

## **Висновки.**

1. Ізотермічна витримка  $\tau = 1$  год. при  $T = 700-800^\circ\text{C}$  дозволяє скорочувати основний час хромування на 2 год, а також розширити первинну зону твердого розчину (до 250 – 280 мкм), що надалі призведе до формування потужної композитної зони.

2. Наявність в ХП фосфору є основною причиною утворення композитної структури.

3. При введенні в технологічний процес хромування етапу ізотермічної витримки слід використовувати високовуглецеві сталі, як вихідний матеріал, бо, по-перше, велика кількість вуглецю дозволяє отримувати розвинуті карбідні колонії, по-друге, зводиться до мінімуму негативне явище утворення знеуглецьованих підповерхневих зон.

4. З точки зору експлуатації інтерес викликають усі три типи дифузійних шарів.

4.1. Дифузійний шар з ультрадисперсними карбідними мікрозернами є порівняно високої твердості ( $H_\mu = 13$  ГПа) і одночасно пластичний, що дозволяє використовувати покриття в умовах реверсивного тертя (напруги, що виникають у результаті знакозмінних навантажень, будуть релаксуватися в пластичній матриці).

4.2. Дифузійний шар після  $\tau = 7$  год (сталь 45) з розвинутою колонією карбідів має верхню підзону гомогенного твердого розчину Cr в  $\alpha\text{-Fe}$ , що дозволить шляхом механічної обробки отримати точний розмір без небезпеки викрошування покриття. Витягнута структура карбідних зерен забезпечить добру несучу здатність покриття.

4.3. Дифузійний шар після  $\tau = 7$  год (сталь У10) має майже суцільне карбідне покриття товщиною до 200-230 мкм. Саме наявність композитної будови різко знижує крихкість покриття, а велика товщина карбідної фази забезпечить високу зносостійкість та міцність всього дифузійного шару. Слід прийняти до уваги практичну відсутність знеуглецьованої зони, що зводить до мінімуму імовірність просідання дифузійного шару.

4.4. Наявність фосфору у покритті різко покращить трибологічні якості останнього, що вже було зауважено при дослідженні на зношування базового покриття (відомо, що ряд мастил, які працюють в умовах високих температур (вище  $200^\circ\text{C}$ ), містять фосфор, як одну з хімічно-активних присадок).

**Література:** 1. Stetsko, A.E., Stetsko, Y.T. (2021). The Influence of Carbon, Carbon, and Boron on the Formation of Diffusion Nanocomposite Hardened Layers on the Surfaces of Steel Parts. In: Fesenko, O., Yatsenko, L. (eds) Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications . Springer Proceedings in Physics, vol 246. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6_47). 2. Stetsko, A.E., Stetsko, Y.T. (2020). Formation of Composite Reinforced Coating by Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Carbon. In: Pogrebnjak, A., Bondar, O. (eds) Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019). Springer Proceedings in Physics, vol 240. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_24). 3. Stetsko, A.E., Korendiy, V.M. (2024). Complex Method of Ni-Co-P Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Titanium. In: Fesenko, O., Yatsenko, L. (eds) Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications. NANO 2023. Springer Proceedings in Physics, vol 253. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5_19).

## НЕДОЛІКИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СОТОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ У ВІДЦЕНТРОВОМУ НАСОСІ НИЗЬКОЇ ШВИДКОХІДНОСТІ

**Сукрут С.В., Ратушний О.В.**

*(Сумський державний університет, м. Суми, Україна)*

Підвищення енергетичної ефективності відцентрових насосів низької швидкохідності є важливим завданням сучасного насособудування. Одним із напрямів вирішення цього завдання є модернізація ущільнюючих вузлів проточної частини насоса шляхом заміни традиційних гладких кільцевих зазорів на сотові ущільнення. Такі ущільнення являють собою кільцевий зазор, робоча поверхня якого сформована системою шестигранних комірок, розташованих у шаховому порядку. Завдяки цій геометрії потік рідини, що перетікає через зазор, зустрічає значно більший гідравлічний опір, що теоретично дозволяє зменшити об'ємні витрати. Проте практична реалізація такої модернізації для насосів низької швидкохідності пов'язана з низкою суттєвих труднощів, що потребують ретельного аналізу.

Перша і найочевидніша проблема має технологічний характер. Виготовлення сотової поверхні з необхідною точністю є складним процесом. Для насосів низької швидкохідності діаметри ущільнюючих зазорів є відносно невеликими, що додатково ускладнює формування правильної геометрії комірок. Похибки виготовлення призводять до нерівномірного розподілу гідравлічного опору по колу ущільнення, що знижує його ефективність і знецінює очікуваний результат від модернізації. Контроль якості сотової поверхні також вимагає спеціалізованого вимірювального обладнання, що підвищує загальну вартість виробництва.

Економічний аспект модернізації є не менш важливим. Собівартість виготовлення сотового ущільнення суттєво перевищує вартість традиційного гладкого зазору. Для насосів низької швидкохідності, які часто застосовуються у серійному виробництві, це робить таку модернізацію економічно невиправданою без підтвердженого суттєвого зростання ККД.

Серйозним недоліком є також чутливість сотової структури до забруднень робочої рідини. При перекачуванні рідин із механічними домішками комірки поступово засмічуються, що з часом повністю усуває ущільнюючий ефект модернізації. Відновлення працездатності ущільнення потребує демонтажу вузла та його очищення, що збільшує витрати на технічне обслуговування та простої обладнання. Саме ця обставина суттєво обмежує сферу застосування

сотових ущільнень у реальних виробничих умовах хімічної та нафтопереробної промисловості.

Окремою проблемою є вплив модернізованого ущільнення на динаміку ротора. Дослідження показують, що в відцентрових машинах до 10% споживаної потужності може втрачатись на витоки через ущільнення робочих коліс, а самі ущільнення за певних умов генерують поперечні гідродинамічні сили дестабілізуючого характеру [1]. Виникає ситуація, коли модернізація, спрямована на підвищення об'ємного ККД, одночасно погіршує вібраційний стан агрегату та скорочує ресурс підшипникових опор.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика типів ущільнень для насосів низької швидкохідності

Параметр	Гладке кільцеве	Сотове	Вихрове
Зниження об'ємних витоків	Базовий рівень	Вище базового	Суттєво вище базового
Складність виготовлення	Низька	Висока	Помірна
Чутливість до забруднень	Низька	Висока	Низька
Динамічна стабільність ротора	Задовільна	Нестабільна за певних умов	Висока
Вартість обслуговування	Низька	Висока	Низька

Таким чином, модернізація ущільнюючих вузлів відцентрових насосів низької швидкохідності шляхом впровадження сотових ущільнень має суттєві обмеження технологічного і експлуатаційного характеру. Перспективним альтернативним напрямом є застосування ущільнюючих елементів вихрового типу, які за рахунок обертового руху рідини здатні забезпечити ефективне зниження витоків при значно простішій конструкції та вищій надійності в реальних умовах експлуатації.

#### Література:

1. Марцинковський В.А., Загоруйко А.В., Савченко Є.М. та ін. Розробка методів чисельного розрахунку та оптимізації гідродинамічних характеристик шпаринних і лабіринтних ущільнень та дослідження їх впливу на динаміку роторів відцентрових машин: звіт про НДР. Суми: СумДУ, 2015.
2. Gülich J.F. Centrifugal Pumps. 4th ed. Springer Nature Switzerland AG 2020. 1264 p. ISBN: 978-3-030-14787-7.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ ЧАСТОК ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

**Турчанін Д.М., Бережна О.В.**

*(ДДМА, м.Краматорськ, Україна)*

У сучасних умовах інтенсивної експлуатації обладнання зростають вимоги до захисних покриттів, які наносяться як на деталі з конструкційних сталей, чавунів, хромових, нікелевих та ванадієвих сплавів, так і на деталі зі спеціальних сплавів та зі сплавів на основі кольорових металів. Сучасні технології дозволяють використовувати для створення покриттів способами газотермічного напилення речовини з практично необмеженою гамою властивостей. На даний час актуальною залишається проблема забезпечення заданих механічних характеристик та одночасно високої адгезійної міцності покриття, нанесеного газотермічним методом. Вихідна форма часток порошкових матеріалів визначає їх технологічні властивості, такі як насипна щільність, текучість, а у зв'язку зі специфікою та швидкоплинністю протікання теплових процесів при газотермічному напиленні вказане істотно впливає на якісні показники нанесеного покриття. Практичний інтерес також представляє дослідження форми часток порошків після проходження ними газо-кисневого струменю з різною його температурою. Форму часток після проходження струменю полум'я фіксували методом вловлювання їх у водяну ванну з наступним просушуванням і дослідженням під мікроскопом. У вихідному стані частки досліджуваних порошкових матеріалів мають різну форму, а саме: частки порошків системи Ni-Al мають сферичну форму, що сприятливо впливає на їх сипучість та подачу в зону напилення; частки окису алюмінію мають округлу форму; частки алюмомагнезійної шпинелі – від округлої до кутової. Проведені експериментальні дослідження показали, що транспортування порошків на основі окису алюмінію до зони розпилювання відбувається значно складніше. Це обумовлено високою гідратаційною здатністю керамічних порошків, що приводить до злипання та комкування часток у більш крупні фракційні утворення. У вихідному стані композиційні порошкові матеріали системи Ni-Al мають нікелеву оболонку, плаковану алюмінієм. Такі порошки характеризуються хорошою сипучістю. Найбільш несприятливу форму у вихідному стані мають порошки на основі міді ( $\approx 90\%$  Cu) – нерегулярну, кутову та витягнуту. Після проходження газо-кисневого струменю частки всіх порошків у більшій або меншій мірі піддаються сфероїдації та диспергуванню, особливо наочно це представляється при використанні ацетилен-кисневого полум'я. Це свідчить про часткове або практично повне розплавлення часток. Дослідженнями підтверджено можливість нанесення методом газотермічного напилення керамічних покриттів на основі  $Al_2O_3$ ,  $MgAl_2O_4$  з використанням у якості горючого газу – ацетилену. Диспергування та розплавлення часток в процесі напилення сприяє отриманню більш щільних покриттів з високою адгезійною міцністю.

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ У ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ВАЛАХ ДВОВАЛЬНОГО ШРЕДЕРА ЯК ОСНОВА ЇХ КОНСТРУКТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

**Фик С.В.**

*(НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)*

Подрібнювальні машини є важливим елементом сучасних переробних виробництв, зокрема у сфері утилізації будівельних відходів, металобрухту та інших матеріалів складної структури. Особливе місце серед них займають двовальні подрібнювачі, які забезпечують ефективне руйнування великогабаритних і неоднорідних об'єктів [1].

Ключовим елементом таких машин є подрібнювальні вали, які сприймають основні силові навантаження в процесі роботи. Вони функціонують в умовах змінного крутного моменту, ударних перевантажень та циклічної дії сил, що зумовлює необхідність точного визначення реальних навантажень для забезпечення їх міцності та довговічності [2].

У якості експериментальної установки використано промисловий двовальний подрібнювач K SHREDDER 600, оснащений системою реєстрації параметрів роботи приводу. Привод подрібнювача включає дизельний двигун та гідравлічну систему з аксіально-поршневою гідропомпою змінної продуктивності, гідромотором високого тиску та планетарним редуктором з передатним числом  $i = 92$ . Робочий тиск у гідросистемі досягає 450–500 бар.

Контроль параметрів здійснюється штатною електронною системою керування, яка фіксує значення тиску в гідролініях та частоту обертання валів.

Дані реєструються у вигляді часових рядів і використовуються для визначення крутного моменту та сил різання.

Аналіз експериментальних даних показав, що процес подрібнення має виражений динамічний характер. Зафіксовано короточасні пікові значення тиску понад 500 бар, що перевищують налаштований рівень спрацювання системи реверсу. Це обумовлено інерційністю гідросистеми та швидкоплинністю процесу руйнування матеріалу.

Розрахунок силових параметрів показав, що максимальна сила різання досягає 310–330 кН, тоді як середнє значення амплітуди навантаження становить близько 70 кН. Пікові навантаження мають імпульсний характер і пов'язані з руйнуванням найбільш міцних фрагментів матеріалу.

Отримані результати свідчать про необхідність врахування динамічної складової навантаження при проектуванні подрібнювальних валів. Використання лише статичних або усереднених значень може призводити до недооцінки навантажень і зниження довговічності конструкції [2].

Таким чином, експериментальне визначення реальних навантажень дозволяє підвищити точність розрахунків, оптимізувати конструкцію валів і забезпечити їх надійність у складних умовах експлуатації.

#### **Література:**

1. Fyk S., Stupnytskyy V. Analysis of design and technology features of industrial shredders // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2024.
2. Fyk S. Assessment of the applicability of cast steels for manufacturing shaft crusher components // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2024.

## УПРАВЛІННЯ ТРУДОВИМИ РЕСУРСАМИ НА МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

**Фоміченко І.П.**

*(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)*

Машинобудування є однією з ключових галузей економіки України, що забезпечує розвиток промислового потенціалу держави, впровадження інноваційних технологій та формування конкурентоспроможної продукції. Однак сучасні умови функціонування машинобудівних підприємств характеризуються значними економічними та соціальними викликами, серед яких воєнний стан, нестача кваліфікованих кадрів, трудова міграція, цифровізація виробництва та посилення конкуренції на ринку праці. У таких умовах ефективне управління трудовими ресурсами стає одним із найважливіших факторів забезпечення стабільної діяльності та розвитку підприємств.

Трудові ресурси є основою функціонування будь-якого підприємства, оскільки саме працівники забезпечують реалізацію виробничих процесів, освоєння нових технологій та підвищення продуктивності праці. Для машинобудівної галузі особливо важливим є наявність висококваліфікованих інженерів, технологів, операторів сучасного обладнання та фахівців з автоматизованих систем управління.

На сучасному етапі машинобудівні підприємства України стикаються з низкою проблем у сфері управління персоналом. Однією з головних проблем є дефіцит кваліфікованих кадрів, спричинений трудовою міграцією, старінням кадрового складу та недостатньою популярністю технічних професій серед молоді. Значна частина молодих спеціалістів обирає роботу за кордоном або в інших сферах економіки через вищий рівень заробітної плати та кращі умови праці.

Крім того, важливим викликом є впровадження цифрових технологій та автоматизації виробництва. Сучасне машинобудування активно переходить до концепції Industry 4.0, що передбачає використання роботизованих систем, цифрового моделювання, ERP-систем та елементів штучного інтелекту. Це вимагає від працівників нових професійних компетенцій, здатності швидко адаптуватися до технологічних змін та постійно підвищувати рівень кваліфікації.

Важливою проблемою залишається і недосконалість систем мотивації праці. На багатьох підприємствах застосовуються застарілі методи стимулювання персоналу, які не забезпечують достатнього рівня зацікавленості працівників у підвищенні ефективності праці. Низький рівень оплати праці, обмежені можливості кар'єрного розвитку та недостатній соціальний захист негативно впливають на продуктивність праці та спричиняють плинність кадрів.

У сучасних умовах важливого значення набуває вдосконалення системи управління трудовими ресурсами. Насамперед підприємствам необхідно формувати ефективну кадрову політику, спрямовану на збереження

кваліфікованого персоналу, розвиток кадрового резерву та підвищення престижу технічних професій. Важливим напрямом є впровадження сучасних HR-технологій, автоматизація кадрових процесів, електронний документообіг та системи оцінювання ефективності персоналу.

Особливу увагу необхідно приділяти професійному розвитку працівників. Підприємствам доцільно організовувати курси підвищення кваліфікації, професійне навчання, тренінги та програми розвитку цифрових компетентностей. Інвестиції у людський капітал сприяють підвищенню продуктивності праці, покращенню якості продукції та забезпечують інноваційний розвиток підприємства.

Одним із найважливіших напрямів розвитку трудового потенціалу машинобудівних підприємств є залучення випускників закладів вищої освіти. Молоді спеціалісти володіють сучасними знаннями, цифровими навичками та здатністю швидко освоювати нові технології. Проте значна частина випускників не зацікавлена у працевлаштуванні в машинобудівній галузі через недостатній рівень мотивації та невисокий престиж технічних професій.

Для залучення молодих кадрів машинобудівним підприємствам необхідно активно співпрацювати із закладами вищої освіти. Ефективними заходами є:

- організація виробничої практики та стажувань;
- проведення днів кар'єри;
- впровадження програм дуальної освіти;
- створення системи наставництва;
- надання стипендій та грантів студентам;
- фінансування цільової підготовки майбутніх фахівців.

Особливу роль у процесі адаптації молодих працівників відіграє наставництво. Досвідчені працівники допомагають випускникам швидше освоїти виробничі процеси, набути практичних навичок та інтегруватися у трудовий колектив. Це сприяє зменшенню плинності кадрів та підвищенню ефективності роботи молодих спеціалістів. Крім того, сучасним підприємствам необхідно формувати позитивний імідж роботодавця. Молодь більше зацікавлена працювати на підприємствах, які використовують сучасні технології, забезпечують комфортні умови праці, підтримують професійний розвиток працівників та створюють можливості для кар'єрного зростання. Саме тому підприємствам важливо впроваджувати елементи корпоративної культури, соціальної підтримки та сучасного менеджменту персоналу.

Таким чином, ефективне управління трудовими ресурсами є однією з головних умов стабільного розвитку машинобудівних підприємств України. У сучасних умовах підприємствам необхідно приділяти особливу увагу кадровій політиці, професійному розвитку працівників, цифровізації управління персоналом та залученню молодих спеціалістів. Комплексний підхід до управління трудовими ресурсами сприятиме підвищенню продуктивності праці, конкурентоспроможності підприємств та забезпеченню сталого розвитку машинобудівної галузі України.

## РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПУСКУ ПРИВІДНОЇ СИСТЕМИ З КРИВОШИПНО-ШАТУННИМ МЕХАНІЗМОМ

**Харченко Є. В., Охримович А. П.**

*(НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)*

Кривошипно-шатунні механізми широко використовують в енергетичних, транспортних, технологічних машинах, зокрема, у двигунах внутрішнього згоряння, в помпах бурових установок, у щоккових дробарках, у завантажувальних пристроях сільськогосподарських машин, у пилорамах тощо. Вхідну ланку кривошипно-шатунного механізму електродвигун приводить в обертальний рух, а вихідна ланка (поршень) здійснює зворотно-поступальний рух. Зведений до вхідної ланки момент інерції механізму є періодичною функцією координати руху зазначеної ланки, що спричиняє виникнення коливальних явищ як у приводі, так і в машині у цілому. Тому дослідження процесів пуску привідних систем циклічної дії становить не лише теоретичний, а й практичний інтерес. Для забезпечення належної точності розрахунку нестационарних режимів роботи електромеханічних привідних систем необхідно враховувати тісний зв'язок електромагнітних і механічних коливальних явищ.

Методи кінематичного і динамічного аналізу механізмів і машин, а також основи теорії механічних коливань з достатньою повнотою викладені у працях [1–3]. Методи математичного моделювання електромагнітних явищ в електричних двигунах – у праці [4]. У даній доповіді електромагнітні і механічні явища у привідній системі розглядаються у нерозривному взаємозв'язку.

Побудовано математичну модель динамічних процесів, що відбуваються у привідній системі, яка включає асинхронний двигун, пружну муфту і кривошипно-шатунний механізм. Електромагнітні явища у двигуні описуються чотирма звичайними нелінійними диференціальними рівняннями. Рівняння руху елементів приводу одержано за схемою рівнянь Лагранжа другого роду. Розрахунок перехідного процесу зводиться до числового розв'язання задачі Коші для нелінійної системи диференціальних рівнянь. Досліджено вплив технологічних навантажень, а також жорсткості пружної муфти на зусилля в елементах системи. Підсумком роботи є те, що у ній запропоновано уточнений підхід до математичного моделювання нестационарних динамічних процесів у машинних агрегатах з урахуванням несталості пружно-інерційних характеристик елементів системи, а також взаємозв'язку коливальних явищ різної фізичної природи.

Одержані результати можуть бути використані під час проєктування привідних систем з важливими механізмами.

**Література:** 1. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин. – К.: Наукова думка, 2002. – 661 с. 2. Кіницький Я. Т. та ін. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad: Навч. посібник / Я. Т. Кіницький, В. О. Харжевський, М. В. Марченко. – Хмельницький: ХНУ, 2014. – 295 с. 3. Василенко М. В. та ін. Теорія коливань і стійкості руху: Підручник / М. В. Василенко, О. М. Алексейчук. – К.: Вища школа, 2004. – 525 с. 4. Костинюк Л. Д. та ін. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ХОЛОДНИМ ВИДАВЛЮВАННЯМ ДЕТАЛІ «СТАКАН З ФЛАНЦЕМ»

Хмарський Д.П., Бочковий Д.О., Музикін Є.С.  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

В різних галузях промисловості широко застосовуються деталі, які виготовляються холодним об'ємним штампуванням. Різновидом холодного об'ємного штампування є холодне видавлювання. Технологічні процеси холодного видавлювання відрізняються високою ефективністю і розмаїттям можливих варіантів виконання [1].

Метою теоретичного дослідження є аналіз процесу холодного видавлювання деталі «Стакан з фланцем», який складається з трьох переходів: закрите осадження (калібрування), суміщене зворотне видавлювання та висадка фланця на торці стакану (рис. 1). В даній тезі перший перехід (закрите осадження) не розглядається через те, що ця операція є підготовчою. Дослідження проводилось за допомогою методу скінчених елементів у програмі DEFORM 3D. В якості матеріалу заготовки для виготовлення деталі «Стакан з фланцем» було розглянуто алюміній марки 6063.

Для моделювання процесу суміщеного зворотного видавлювання (рис. 1, а) та висадки фланця (рис. 1, б) використовувались наступні геометричні параметри та їх значення:  $R_1$  та  $l$  – радіус та висота заготовки ( $R_1=21$  мм,  $l=21$  мм),  $R_2$  – радіус порожнини стакану ( $R_2=32$  мм),  $l_1$  – висота напівфабрикату після другого переходу ( $l_1=35$  мм)  $R_3$  радіус меншої основи конічного відростка ( $R_3=5$  мм),  $l_2$  – висота конічного відростка ( $l_2=6$  мм),  $l_3$  – товщина дна напівфабрикату ( $l_3=8$  мм),  $r$  – радіус заокруглення кромки інструментів ( $r=1,6$  мм),  $V_1=V_2$  - швидкість руху пуансонів ( $V_1=V_2=1$  мм/с). Для моделювання процесу висадки фланця (рис. 1, б) були обрані наступні значення геометричних параметрів:  $l_4$  – висота поковки після третього переходу ( $l_4=30$  мм),  $h$  – товщина фланця ( $h=5$  мм),  $R_4$  – зовнішній радіус фланця ( $R_4=26$  мм).

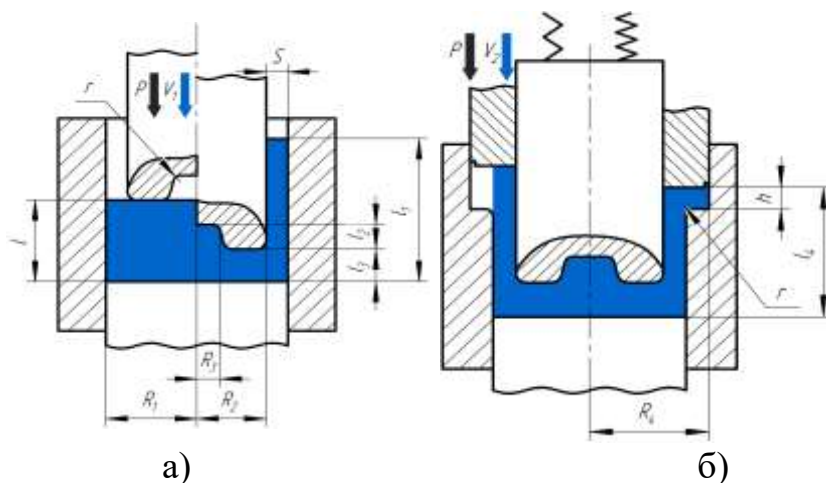


Рис. 1. Схеми процесів: суміщеного зворотного видавлювання (а) і висадки фланця (б)

Викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та інтенсивності напружень в об'ємі заготовки, що деформується для суміщеного зворотного видавлювання та висадки фланця представлено на рис. 2.

Як видно (рис. 2), під час суміщеного зворотного видавлювання, найбільша інтенсивність деформацій зосереджена у внутрішніх шарах металу утворюваної стінки, що контактують з зовнішньою поверхнею пуансона. Найбільша інтенсивність напружень зосереджена в нижній частині напівфабрикату. Під час висадки фланця, найбільші значення інтенсивності деформації зосереджені в центральній частині фланця, а напруження розподіляються по утворюваному фланцю практично рівномірно.

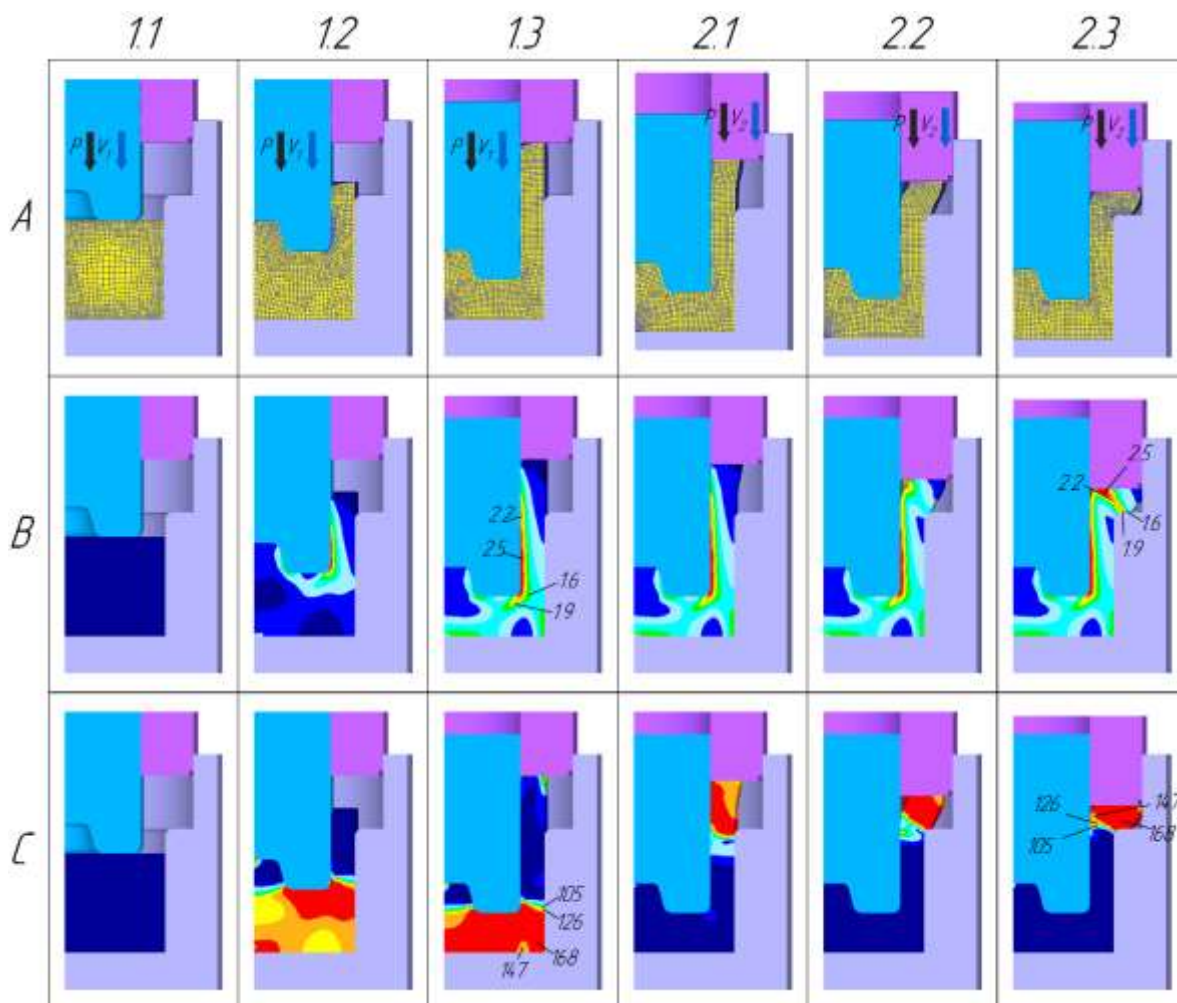
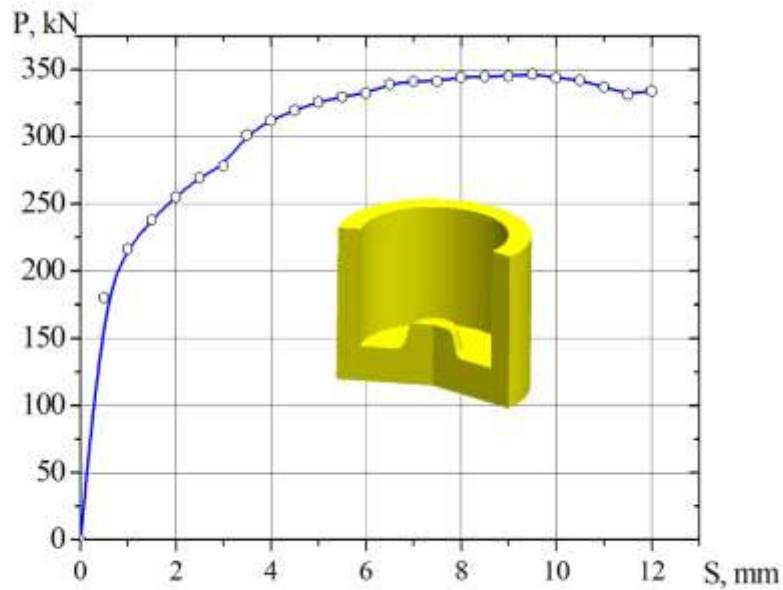


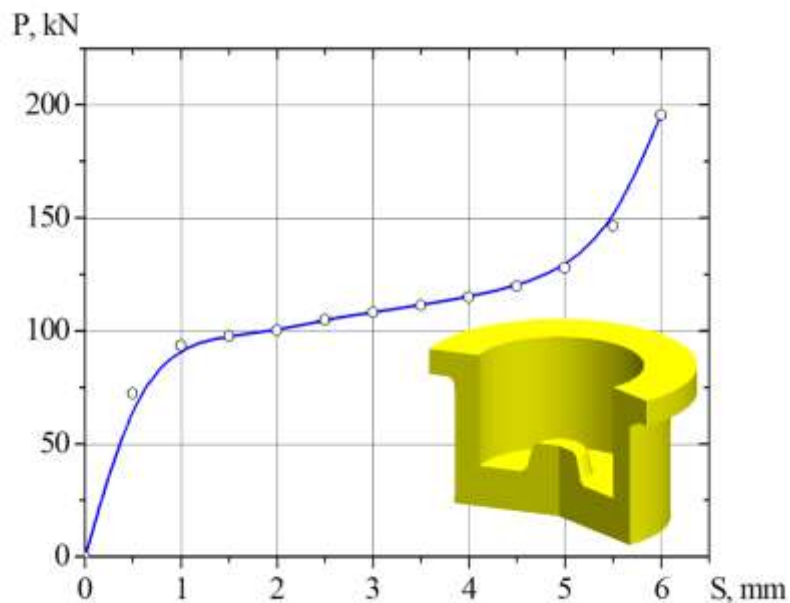
Рис. 2. Викривлення ділильної сітки (рядок А), розподіл інтенсивності деформацій (рядок В) та інтенсивності напружень (рядок С, МПа) в об'ємі заготовки, що деформується для суміщеного зворотного видавлювання (стовпчики 1.1-1.3) та висадки фланця (стовпчики 2.1-2.3)

На рис. 3 зображені графіки залежності сили видавлювання від ходу пуансона під час суміщеного зворотного видавлювання (рис. 3, а) та висадки фланця (рис. 3, б). На рис. 3, а спостерігається зростання сили до максимальних значень в 348 кН. На рис. 3, б спостерігається спочатку відносно повільне

зростання сили, яка наприкінці ходу стрімко набуває значення 198 кН через закриту схему процесу.



а)



б)

Рис. 3. Графік залежності сили від ходу пуансона під час суміщеного зворотного видавлювання (а) та висадки фланця (б)

**Література: 1.** Алієв І.С., Абхарі П.Б., Єрьоміна А.А. Моделювання кінематичних варіантів бічного видавлювання деталей з відростками. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції “Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку”. 2014. №3. с. 12-13.

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМУВАННЯ САМ-СИСТЕМ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК У ВАЖКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

**Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Валецький Б.П., Редько П.Р.**

*(Луцький національний технічний університет м. Луцьк, Україна)*

Програмування САМ-систем (Computer-Aided Manufacturing) у важкому машинобудуванні є критично важливим етапом, оскільки обробка великогабаритних і високовартісних заготовок не пробачає технологічних помилок. Обробка деталей масою в десятки тон (наприклад, станин, корпусів турбін або валів) вимагає генерації траєкторій з величезними масивами даних (G-кодів). САМ-система (апроксимація поверхонь) повинна точно розраховувати мікропереміщення інструменту на великих площах для уникнення появи дефектів обробленої поверхні (зарізів, нерівномірної шорсткості і т.д.) та передчасного зносу або поломки інструменту. Динамічні удари та вібрації, які виникають при різкій зміні напрямку руху інструменту залишають дефекти на деталі. Динамічний контроль осі інструменту при обробленні складних внутрішніх порожнин деталей мінімілізує вплив негативних факторів. САМ-система безперервно змінює кут нахилу фрези, щоб уникнути зіткнення супорта з контурами деталі. Тому програмування вимагає точного контролю точок зміни траєкторії, де лінійні швидкості осей верстата досягають своїх критичних значень [1].

Отже, проаналізуємо ключові специфічні особливості та інженерні виклики при розробці керуючих програм для верстатів з ЧПК у цій галузі. Зіткнення шпинделя важкого верстата з ЧПК із заготовкою веде до збитків у мільйони гривень, відповідно необхідною умовою є використання повного цифрового двійника верстата у САМ-системах, на основі симуляції та верифікації траєкторій (Digital Twin). На рис. 1 представлено схему функціонування цифрового двійника, який візуалізує повний цикл перевірки керуючих програм для верстатів з ЧПК. Програмне забезпечення в автоматичному режимі перевіряє траєкторію руху інструменту (або патрону) на предмет несанкціонованого врзання в тіло деталі чи елементів кріплення [2].

Також в сучасному машинобудуванні широко застосовують різні методи оптимізації режимів різання (High-Speed & High-Feed Machining). Для важкого машинобудування характерні великі чорнові припуски (іноді десятки міліметрів). Керуюча програма має пошарово розподіляти навантаження [3] для ефективного знімання металу. Відповідно застосовують стратегії зняття постійної товщини стружки. САМ-системи розраховують трохоїдальні та адаптивні траєкторії фрезерування. Головною перевагою таких траєкторій є те, що товщина стружки залишається стабільною, але водночас зменшується нагрівання фрези і вона не зазнає різких перевантажень. Це суттєво подовжує термін служби інструменту.



Рис. 1. Схема функціонування цифрового двійника при перевірці керуючих програм

Оскільки важкі верстати часто є унікальними або модернізованими, стандартні налаштування САМ-систем часто не підходять. Коректне переведення траєкторії з САМ-середовища у специфічний код конкретної стійки ЧПК є найскладнішим етапом програмування. Тому, щоб оптимізувати цей процес, сучасні САМ-системи використовують кругову інтерполяцію, або сплайнову апроксимацію замість лінійної.

**Література:** 1. Редько П.Р., Четвержук Т.І. Шляхи підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК. Тези доповідей XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент». м. Житомир 11-13 листопада 2025 р. С. 109-112. 2. Четвержук, Т.І. Режими роботи системи ЧПУ верстата в процесі його експлуатації./ Четвержук, Р.М. Полінкевич, Р.Г. Редько, Н.Т. Зубовецька // Наукові нотатки: міжвуз. зб.наук. праць. – Луцьк, 2019. – Вип. 66. – С. 373-378. 3. Taras Chetverzhuk, Oleg Zabolotnyi, Viktor Sychuk, Roman Polinkevych and Anatolii Tkachuk. A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC), Print ISSN: 2516-0281, Online ISSN: 2516-029X, pp. 37-47, Vol. 3, No. 4, 1st October 2019, Published by International Association of Educators and Researchers (IAER), DOI: 10.33166/AETiC.2019.04.004, Available: <http://aetic.theiaer.org/archive/v3/v3n4/p4.html>.

## МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ДІАМЕТРУ СТАКАНУ В ПРОЦЕСІ ПОСЛІДОВНОГО РАДІАЛЬНО-ПРЯМОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

**Чучин О.В., Малій О. Г., Ковальов І.О.**  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

На початку послідовного радіально-прямого видавлювання відбувається радіальне видавлювання фланцю, яке потім в зоні розвороту змінюється на пряме видавлювання і утворюється стінка порожнистого виробу типу стакану [1].

Наявність при радіальному видавлюванні різноіменної схеми напруженого стану з одним окружним розтягуючим напруженням призводить, з одного боку, до зниження енергосилових параметрів порівняно з прямим видавлюванням однотипних деталей, а, з іншого боку, до появи тріщин на бічній поверхні одержуваного фланця і його руйнування. Тому виявленню і дослідженню схем деформування, що дозволяють збільшити граничний діаметр фланця, а потім і поперечні розміри стакану, приділяється велика увага.

Метою дослідження є виявлення таких схем деформування, які б дозволили збільшити діаметр стакану в процесі послідовного радіально-прямого видавлювання.

У представлених схемах 1-6 (таблиця 1), крім збільшення поперечних розмірів порожнистих деталей, переслідуються ще дві важливі цілі: підвищення якості цих деталей і зменшення ймовірності появи тріщин на кромці фланця на стадії радіальної течії матеріалу заготовки.

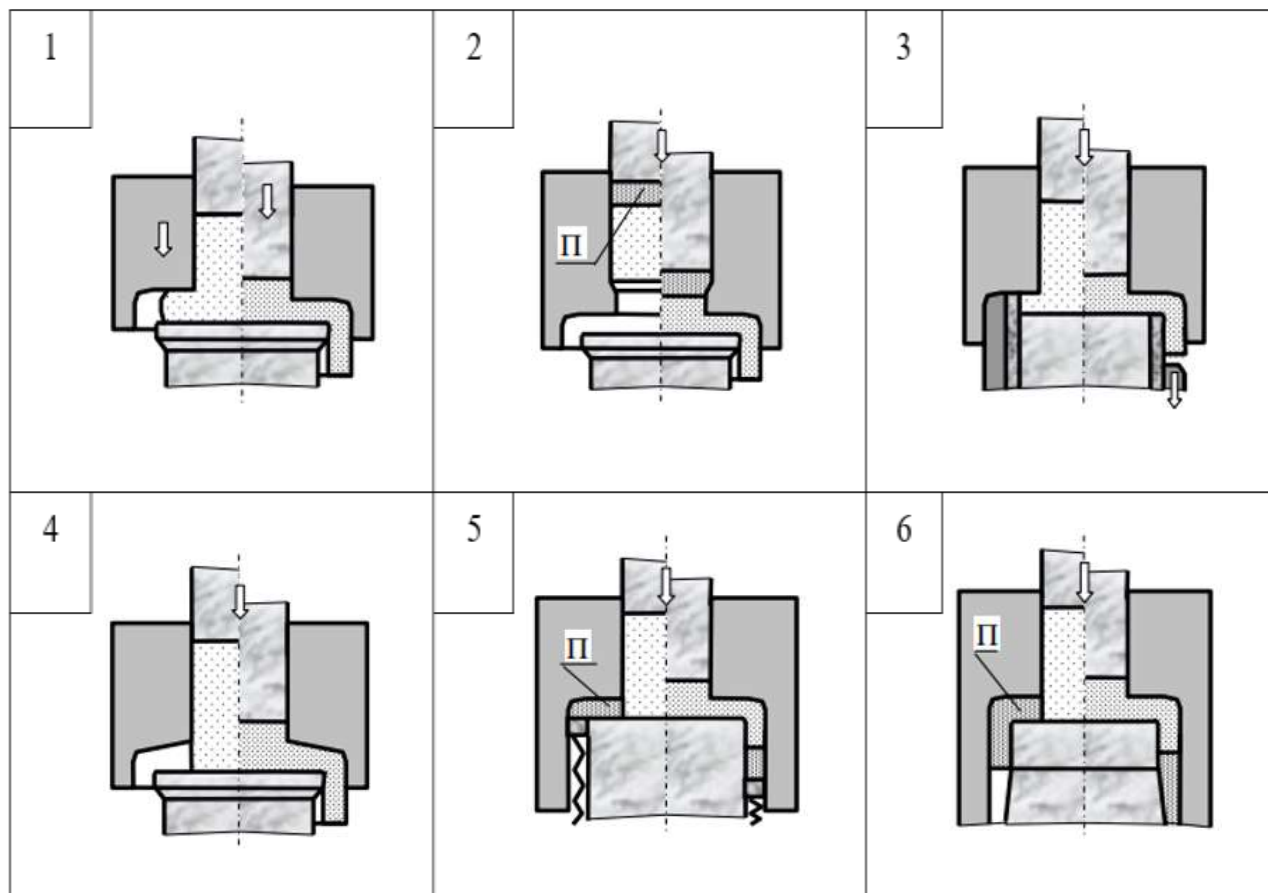
Поставлені цілі в схемах 1-3 вирішуються завдяки зміні операцій по ходу процесу послідовного радіально-прямого видавлювання.

У схемі 1 висаджування верхньою напівматрицею фланця більшої товщини ніж потрібно, як і у випадку тільки з радіальним видавлюванням, дозволяє збільшити поперечні розміри стакану. До негативних сторін цієї схеми можна віднести різке збільшення сили деформування на стадії висадки.

У схемах 2 і 3 за рахунок зміни операцій відповідно редукування на радіальне видавлювання і закритого радіального видавлювання на відкрите відбувається зміна знаків компонент пластичної деформації на протилежний. Для схеми 2 заготовку можна підготувати також у результаті попереднього волочіння. Тоді відпадає необхідність здійснення операції редукування в матриці. Замість двох переходів у різних штампах реалізація схеми 3 на практиці дозволяє видавити фланець на стадії радіальної течії необхідного розміру за один робочий хід в одному штампі. У цьому випадку, в процесі закритого радіального видавлювання (перша стадія виготовлення фланця), необхідно отримати діаметр фланця менше критичного, для якого характерна поява тріщин. При цьому зовнішня кільцева частина нижньої складової напівматриці перекриває порожнину для радіальної течії матеріалу, що видавлюється. На другій стадії зовнішня кільцева частина нижньої складової напівматриці переміщається вниз,

даючи можливість при подальшій радіальній течії металу та його розвороті отримати необхідні поперечні розміри стакану.

Таблиця 1 – Можливості збільшення поперечних розмірів деталі «Стакан» в схемах



Поставлені цілі в схемах 4-6 вирішуються завдяки підвищенню гідростатичного тиску в області фланця, а, відповідно, зменшенню окружного розтягуючого напруження.

Це можливо в схемі 4 при видавлюванні фланця в звужувальну порожнину, в схемі 5 при наданні протитиску радіальній течії або рідиною, або пластичним середовищем «П» (наприклад, свинцем), що спирається на вертикально розташований буфер і стискаючий його при розвороті течії пластичного середовища з радіального напрямку на прямий. В схемі 6 для здійснення протитиску замість буфера можна використовувати вертикально сконструйовану порожнину, що звужується між бічними поверхнями отвору в матриці і нижнього пуансона. Схеми 4 та 5 сприяють не тільки збільшенню зовнішнього діаметра порожнистого виробу, але і отриманню чітко оформленої торцевої поверхні стінки стакану, хоча при цьому відбувається зростання зусилля деформування.

**Література:** 1. Чучин О.В., Чепеленко О.Ю. Визначення розпираючих тисків на внутрішні поверхні матриці при радіально-прямому видавлюванні. *Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: Збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції*. Краматорськ : ДДМА. 2024. С. 274-281.

# ДІАГНОСТИКА ГОТОВНОСТІ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ AGILE-ІНСТРУМЕНТІВ

Шашко В.О., Шашко М.Д.  
(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)

В умовах сучасних викликів, зумовлених воєнними ризиками, технологічними трансформаціями та нестабільністю ланцюгів постачання, машинобудівні підприємства України змушені шукати нові механізми забезпечення адаптивності [1]. Гнучкі підходи (Agile), що базуються на ітеративності та швидкому реагуванні на зміни, виступають перспективною альтернативою традиційним каскадним моделям [1, 2]. Проте специфіка галузі — значна капіталомісткість, жорстка регламентація та тривалий життєвий цикл виробництва — створює бар'єри для прямого запозичення IT-методологій. Необхідність виваженого підходу до інтеграції Agile-інструментів обумовлює потребу у розробленні спеціалізованого діагностичного інструментарію.

Практика свідчить, що імплементація гнучких методів без попереднього аналізу часто має фрагментарний характер, що призводить до дезорганізації процесів та супротиву персоналу. Це вимагає відмови від загальних рекомендацій на користь системного оцінювання внутрішніх і зовнішніх чинників готовності підприємства.

Пропонується багаторівнева структура діагностики, яка повинна охоплювати не лише технічні можливості, а й організаційну зрілість системи управління. Концептуально структура змісту інструментів оцінювання має базуватися на таких блоках (рисунок 1).



Рис. 1. Багаторівнева структура діагностики готовності машинобудівних підприємств до впровадження Agile-інструментів

Перший - продуктово-технологічний контур, який передбачає оцінку об'єктивних параметрів виробництва, таких як рівень кастомізації продукції, можливість модульного проєктування та ступінь цифровізації процесів.

Другий - організаційно-управлінський контур, в межах якого проводиться аналіз поточної структури на предмет здатності до формування кросфункціональних команд, швидкості прийняття рішень та наявного рівня децентралізації повноважень.

Третій - культурно-поведінковий контур, в межах якого проводиться діагностика готовності персоналу та керівництва до експериментування, ставлення до помилок як до джерела навчання та наявності практик регулярного зворотного зв'язку.

Четвертий - ринково-клієнтський контур, в межах якого відбувається визначення ступеня залученості замовника у процес розробки та готовності ринку до ітеративного уточнення вимог.

Процес оцінювання доцільно розділити на два етапи (рисунк 2):

1) Експрес-фільтр. Передбачає кількісне оцінювання ключових індикаторів (наприклад, через матрицю балів) для швидкої ідентифікації критичних обмежень.

2) Глибока верифікація. Передбачає якісну перевірку через структуровані чек-листи, що дозволяють виявити приховані ризики в організаційній культурі та бізнес-процесах.



Рис. 2. Етапи діагностики готовності машинобудівних підприємств до впровадження Agile-інструментів

Результатом застосування такої структурованої діагностики має стати обґрунтований вибір управлінської моделі - від збереження традиційного підходу до переходу на гібридні форми (Agile-Waterfall), що є найбільш адекватним варіантом для складних машинобудівних проєктів. Це дозволить мінімізувати втрати ресурсів та підвищити результативність трансформаційних змін.

**Література:** 1. Шашко В. Адаптація Agile-підходів до управління проєктами в машинобудуванні в умовах структурних трансформацій. Галицький економічний вісник. 2026. Том 99. № 2. С. 257-271. DOI [https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk\\_tntu2026.02.257](https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2026.02.257) (дата звернення: 20.05.2026). 2. Agile Manifesto. Manifesto for Agile Software Development [Electronic resource]. 2001. Available at: <https://agilemanifesto.org> (дата звернення: 20.05.2026).

## МЕДІА ЯК ІНСТРУМЕНТ АНТИКРИЗОВОГО МЕНЕДЖМЕНТУ В ПРОМИСЛОВОМУ СЕКТОРІ УКРАЇНИ

**Яковенко Ю.Л.**

*(ДДМА, м. Краматорськ, Україна)*

Сучасний кризовий менеджмент в Україні функціонує в умовах безпрецедентних безпекових та економічних викликів. Стабільність підприємств вітчизняного промислового сектору в періоди гострих криз (руйнування, релокація, кадровий голод) безпосередньо залежить від ефективності комунікаційного супроводу. За цих умов мас-медіа та цифрові платформи перетворюються на провідний інструмент антикризового управління, здатний утримувати репутаційний капітал підприємств, координувати галузь та протидіяти інформаційним загрозам [1, с. 255].

Мета роботи - проаналізувати еволюцію та сучасні механізми використання мас-медіа як інструменту антикризового менеджменту в промисловому секторі України в історичній перспективі.

В антикризовому управлінні промисловим сектором медіа-комунікації виконують роль «репутаційного щита» [2, с. 68-69]. Історико-управлінський аналіз дозволяє виділити три ключові комунікаційні стратегії, що адаптовані до сучасних реалій:

1. Комунікаційний супровід релокації та індустріальних змін. Використання медіа-ресурсів для таргет-інформування ринку про життєздатність підприємств. Грамотне управління інформаційними потоками мінімізує ризики розриву контрактів [3, с. 40].

2. Антикризовий PR та репутаційний менеджмент. Наднаціональні та локальні цифрові платформи (зокрема Telegram) стають інструментом соціального маркетингу праці, популяризації індустріальних професій та залучення кадрового потенціалу в кризових умовах [4].

3. Інтеграція в систему стратегічних комунікацій (StratCom). Позиціонування промислового потенціалу держави в міжнародному медіа-просторі. Медіа транслюють кейси стійкості, перетворюючи бренд підприємств на елемент інформаційної безпеки держави [5, с. 88].

Ретроспективний аналіз доводить, що інформаційний вакуум або замовчування стану промисловості під час історичних криз минулого (зокрема,

досвід індустріальних криз ХХ ст.) завжди руйнували внутрішні економічні зв'язки. Натомість проактивна комунікаційна модель, яка використовується сьогодні, дозволяє долати управлінський хаос. Досвід минулого свідчить: ефективність управління підприємством визначається не лише виробничими потужностями, а й здатністю контролювати інформаційний простір навколо нього [6, с. 109-110].

Таким чином, масмедіа в промисловому комплексі є критично важливим інструментом антикризового менеджменту. Сучасна комунікаційна модель, що спирається на історичний досвід додання криз, базується на принципах проактивності, антикризового PR та інтеграції в систему StratCom, що забезпечує інформаційний захист індустріального сектору.

### **Література:**

1. Шепель Т. Релоковані підприємницькі структури України на сучасному етапі їх функціонування: роль, значення, ретроспективний аналіз. Економічний простір. 2025. № 197. С. 254–261. URL: <https://economicspace.pgasa.dp.ua/article/view/322741/313080> (дата звернення: 22.05.2026).

2. Фалович В., Бакуліна Н., Шушпанов Д. Особливості використання антикризових комунікацій в управлінні корпоративною репутацією. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2020. Вип. 25. С. 66-71.

3. Зеліско Н. Релокація підприємства як інструмент економічної безпеки в умовах воєнного стану / Н. Зеліско. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія : Економіка АПК. 2023. № 30. С. 38-43. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vlnau\\_econ\\_2023\\_30\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vlnau_econ_2023_30_8) (дата звернення: 22.05.2026).

4. Антикризовий PR: як врятувати репутацію бренду в епоху соціальних мереж. MMR.ua : онлайн-медіа про маркетинг, PR та комунікації. 2024. URL: <https://mmr.ua/longreads/pr/antykryzovyj-pr-yak-vryatuvaty-reputacziyu-brendu-v-epohu-soczialnyh-merezh/> (дата звернення: 22.05.2026).

5. Кравчук Н., Андрощук Д., Бойко Т. Стратегічні комунікації та публічна дипломатія як інструменти формування нового світового порядку й зміцнення конкурентоспроможності України. EMPIRIO.. 2026. Т. 3. Вип. 1. С. 83-96. 6. Овсяник В. М. Кризові комунікації в умовах надзвичайних ситуацій / В. М. Овсяник. Вісник Національної академії державного управління при Президентові України. Серія : Державне управління. 2018. № 2. С. 105-111. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnaddy\\_2018\\_2\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnaddy_2018_2_17) (дата звернення: 22.05.2026).









## ЗМІСТ

<i>Abhari P.B., Solianov D.O., Oliinyk D.S.</i> Simulation of double-ended radial extrusion using QForm: Analysis of deformation mechanics.....	6
<i>Deineka K.Yu., Naumenko Yu.V., Zhabchyk S.V.</i> Some results of solving the generalized cross-industry problem of increasing the efficiency of processing granular materials in heavy-duty drum-type machines based on the established effect of self-excitation of auto-oscillations.....	8
<i>Karnaikh S. H.</i> Energy-assisted cutting–upsetting of precision workpieces .....	11
<i>Roman Protasov, Juraj Ondruška, Votontsov Borys, Bondarenko Oleksiy, Ustynenko Oleksandr, Vorontsov Serhii.</i> Application of thin hard coatings to the contact surfaces of the loading coupling of a high-speed FZG-Type test rig.....	15
<i>Авраменко К., Самойленко А.</i> Імітаційне моделювання бізнес-процесу масового найму персоналу як складної системи масового обслуговування...	17
<i>Баркова С.О., Алтухов В.О.</i> Уніфікована архітектура інтеграції систем управління задачами у середовища розробки програмного забезпечення та ігрові рушії.....	20
<i>Баркова С.О., Калюженко В.В.</i> Автоматизація управлінських процесів розробки програмного забезпечення на основі інструментарію CI/CD та метрик DevOps .....	22
<i>Бень Ю.Є.</i> Динамічне моделювання регенеративних автоколивань.....	23
<i>Бержной Р.А. Дергоусов В.М., Пермяков О.А.</i> Особливості виготовлення редукторів різання очисних вугільних комбайнів в умовах дрібносерійного виробництва .....	26
<i>Бессараб М.П., Юрченко Ю.Ю.</i> Роль інформаційних технологій у розвитку важкого машинобудування .....	29
<i>Бица Р.О.</i> Необхідність в параметризації поверхонь з регулярними мікрорельєфами .....	32
<i>Бурцева О.Є., Бондаренко А.О.</i> Товарна політика торговельного підприємства в умовах нестабільної економіки.....	35

<b>Васильченко Я.В., Мироненко О. Є.</b> Системний підхід до інструментального забезпечення формоутворення великомодульних зубчастих коліс на гнучких комплексах .....	37
<b>Васильченко Я.В., Пономаренко О.В., Захаров Є.О., Короття П. Р.</b> Комплексна методика дослідження процесів точіння сталей у важких умовах термомеханічного навантаження для важкого машинобудування .....	39
<b>Голофєєва М.О., Паленний Ю.Г., Салютін М.В.</b> Розрахунок невизначеності вимірювань малих швидкостей металообробного обладнання.....	42
<b>Григор'єв Ю.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С.</b> Використання високоенергетичних сталих магнітів при магнітно-абразивній обробці.....	45
<b>Дубініна О.Т., Медведєв В.В.</b> Вплив магнітно-імпульсної обробки на твердість сталі 40Х в загартованому стані .....	47
<b>Дядя С.І., Козлова О.Б., Тришин П.Р., Крамаренко О.О.</b> Забезпечення стабільного фрезування кінцевими фрезами з великим вильотом.....	49
<b>Задорожня І. М., Кечко А. В., Приймак М. С.</b> Теоретичні аспекти вдосконалення властивостей електромеханічних систем транспортних механізмів для забезпечення оптимальних режимів роботи .....	50
<b>Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В.</b> Комплексна експериментальна оцінка структури і стійкості наплавлених покриттів для робочих органів ґрунтообробних машин.....	53
<b>Зінченко І.Б.</b> Планування експериментальних досліджень регулярних мікрорельєфів ротаційного виду.....	56
<b>Калініченко В. В., Сазонов Т.О.</b> Можливості та переваги дослідження характеристик енергоефективності токарної обробки на важких верстатах у режимі реальної виробничої ситуації .....	59
<b>Кінденко М. І.</b> Управління режимами магнітно-імпульсної обробки осьового інструменту зі швидкорізальних сталей за допомогою методів штучного інтелекту .....	61
<b>Кінденко М. І.</b> Методи магнітної обробки ріжучого інструменту .....	63
<b>Клименко Г.П., Рєва Є.С., Чумаченко В.П.</b> Інтегрована система діагностики та адаптивного керування роботою важкого машинобудівного обладнання в умовах експлуатаційного зносу .....	66

<i>Клименко С.А., Коломієць В.В., Коваленко Я.П., Мельнійчук Ю.О., Мельничук П.П., Ночвай В.М., Пилипенко О.М., Полонський Л.Г.</i>	
Обробка різанням наплавлених та напилених деталей .....	69
<i>Ковалевський С.В.</i> Тенденції розвитку цифрових двійників у машинобудуванні в умовах Industry 5.0.....	71
<i>Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Григоренко Д.М., Гринь А. В.</i> Підвищення якості обробки при твердому точінні деталей важкого машинобудування на основі віброакустичного контролю процесу .	73
<i>Ковальов В.Д., Кіоран Ю.В.</i> Методика створення інтелектуальної бази знань для підтримки інженерних рішень на підприємствах важкого машинобудування.....	76
<i>Ковальов В.Д., Лобур Ю.М., Чуйко В.В., Міхеєв А.О. Підгорний М. І.</i> Методика оцінки технічного стану та обґрунтування ремонтних рішень для важких металорізальних верстатів .....	78
<i>Кондратенко О.О., Кондратенко К.В.</i> Використання цифрових технологій для забезпечення ефективного управління командами .....	81
<i>Косарєв В.С., Музикін П.С., Садовський Є.В.</i> Дослідження утворення дефекту протрілу в процесі комбінованого радіально-зворотного видавлювання.....	83
<i>Крупа В.В., Штогрин С.П., Салійчук В.С.</i> Дослідження потужності різання при довбанні внутрішні гвинтових канавок у легованій гартованій сталі.....	85
<i>Лавріненко В.І.</i> Керамічні кульки трибологічного призначення: особливості їх обробки – сучасні тенденції .....	88
<i>Мальон А.В., Ступницький В.В.</i> Чисельне моделювання процесу токарного різання алюмінієвих сплавів .....	91
<i>Манохін А.С., Клименко С.А., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю., Чумак А.О., Камчатна-Степанова К.В.</i> Вплив багатошарової архітектури термобар'єрного покриття на термічну складову залишкових напружень .....	93
<i>Мироненко Є.В., Гончаров С.П.</i> Системно- структурний аналіз блочно-модульних конструкцій інструментів.....	95
<i>Михальчук А. О., Віштак І. В.</i> Психологічні аспекти безпеки праці менеджера .....	96

<b>Моркун В.С., Грищенко Я.О.</b> Підвищення ефективності грохота шляхом впровадження комбінованого електромагнітного-електромеханічного приводу .....	99
<b>Міранцов С.Л., Хорошайло В.В., Рябченко М.В.</b> Розробка та дослідження високоефективних збірних різців для точіння деталей на важких верстатах .....	102
<b>Мірошниченко О.В.</b> Вплив просторового розташування різальних пластин на стабільність процесу свердління .....	104
<b>Надтока В.М., Дейнеко Л.М., Краєв М.В.</b> Нанесення захисних покриттів на внутрішню поверхню артилерійського ствола .....	107
<b>Нерубацький В.П.</b> Інтелектуалізовані підходи до підвищення ефективності експлуатації асинхронних тягових електроприводів тепловозів .....	110
<b>Нерубацький В.П., Геворкян Е.С., Комарова Г.Л., Чишкала В.О.</b> Перспективи впровадження високоміцної інструментальної кераміки на основі електроконсолідованих наносистем у повоєнну розбудову промислового комплексу .....	112
<b>Новіцький Ю.Я., Новіцький М. Я.</b> Експериментальне визначення впливу розсіювання енергії в тілі збірного різця на амплітуду його автоколивань....	115
<b>Окіпний І.Б., Сенчишин В.С., Лазарюк В.В.</b> Прогнозування міцності корпусної реакторної сталі методом скінченних елементів .....	120
<b>Оленюк Т.</b> Переваги використання лезових методів обробки перед абразивними під час оброблення гартованих заготовок .....	121
<b>Онисько О.Р., Голик Т.Б.</b> Міцність і надійність замкової нарізи у залежності від конструктивних та технологічних параметрів виготовлення .....	123
<b>Онищук С.Г., Тулунов В.І.</b> Технологічні можливості енергозберігаючих технологій в машинобудуванні .....	125
<b>Петрухін Я.І., Суботін О.В.</b> Застосування критерію Фішера для перевірки достовірності результатів моделювання .....	127
<b>Пожидасєв А.В., Бережна О.В.</b> Сучасні методи обробки листового прокату	129
<b>Рошупкін О. В., Павленко І. В.</b> Діагностування розвитку втомної тріщини ротора Джефкота методом оптимізації рою частинок .....	131

<b>Сорока М. О., Віштак І. В.</b> Моделювання нових конструкцій підшипників із застосуванням адитивних технологій та CAD/FEM-аналізу .	133
<b>Стецько А.Є.</b> Підвищення ресурсу важконавантажених деталей.....	135
<b>Сукрут С.В., Ратушний О.В.</b> Недоліки модернізації сотових ущільнень у відцентровому насосі низької швидкохідності .....	138
<b>Турчанін Д.М., Бережна О.В.</b> Дослідження форми часток порошкових матеріалів при газотермічному напиленні деталей стрічкових конвеєрів .....	140
<b>Фик С.В.</b> Експериментальне визначення навантажень у подрібнювальних валах двовального шредера як основа їх конструктивної оптимізації .....	141
<b>Фоміченко І.П.</b> Управління трудовими ресурсами на машинобудівних підприємствах України в сучасних умовах .....	143
<b>Харченко Є. В., Охримович А. П.</b> Розрахунок процесів пуску привідної системи з кривошипно-шатунним механізмом .....	145
<b>Хмарський Д.П., Бочковий Д.О., Музикін Є.С.</b> Дослідження процесу виготовлення холодним видавлюванням деталі «Стакан з фланцем» .....	146
<b>Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Валецький Б.П., Редько П.Р.</b> Особливості програмування САМ-систем для верстатів з ЧПК у важкому машинобудуванні .....	149
<b>Чучин О.В., Малій О. Г., Ковальов І.О.</b> Методи збільшення зовнішнього діаметру стакану в процесі послідовного радіально-прямого видавлювання	151
<b>Шашко В.О., Шашко М.Д.</b> Діагностика готовності машинобудівних підприємств до впровадження Agile-інструментів .....	153
<b>Яковенко Ю.Л.</b> Медіа як інструмент антикризового менеджменту в промисловому секторі України.....	155

Наукове видання

# **ВАЖКЕ МАШИНОБУДУВАННЯ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

**МАТЕРІАЛИ**  
**XXIV Міжнародної**  
**науково-технічної конференції**

Рекомендовано до друку вченою радою ДДМА,  
протокол № 10 від 28.05.2026

Відповідальний за випуск: Віктор КОВАЛЬОВ  
Комп'ютерне верстання: Максим ШАПОВАЛОВ

Підп. до друку 28.05.2026

Ум. друк. арк. 5,81.

Тираж

Формат 60×84<sup>1/16</sup>.

Обл.-вид. арк. 5,42.

Зам. № 10

---

Видавець і виготівник

Донбаська державна машинобудівна академія

84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру

ДК №1633 від 24.12.2003