

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

**MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE**

**National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"**

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 1(11)'2025

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Techniques in
a machine industry**

No. 1(11)'2025

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

**Харків
НТУ «ХПІ», 2025**

**Kharkiv
NTU "KhPI", 2025**

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 1 (11). – 138 с. – ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).

Видання присвячене висвітленню досягнень у галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення та приділяють особливу увагу: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців у галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

This issue is devoted to clarify achievements in the mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering. The edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Реєстр суб'єктів у сфері медіа, ідентифікатор медіа R30-01541 згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.23 р. № 1075

Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України KB № 24359-14199P від 10 лютого 2020 р.

Мова статей – українська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б» (наказ МОН України № 320 від 07.04.2022 р.).** **Періодичність 2 рази на рік УДК 621.01(062)**

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://tm.khpi.edu.ua/>

Засновник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Founder National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Видавець – кафедра технологій машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ»

Publisher, Department of Machine Building Technology and Metal Cutting Machines, NTU "KhPI"

Редакційна колегія

Editorial board

Головний редактор:

Editor in Chief:

Пермяков О. А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Pernyakov O. A., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Заступник головного редактора:

Deputy editor:

Клочко О. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Klochko O. O., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Відповідальний секретар:

Responsible secretary:

Набока О. В., канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Naboka O. V., Technical College Sciences, Prof. NTU "KhPI", Ukraine

Члени редколегії:

Members of the editorial board:

Антонюк В. С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Antonyuk V. S., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Бембенек Міхал, д-р техн. наук, інженер, проф. АГН, Польща

Bembenek Michal, Dr. Tech. Sciences, engineer, Prof., AGH, Poland

Воронцов Б. С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Vorontsov B. S., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Гасанов М. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Hasanov M. I., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Добротворський С. С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

Dobrotvorskyi S. S., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI"

Дмитриєв Д. О., д-р техн. наук, проф., ХНТУ, Україна

Dmitriev D. O., Dr. Tech. Sciences, Prof., KhNTU, Ukraine

Драган Пераковић PhD, професор, Университет

Dragan Perakovich PhD, professor, University, Zagreb, Croatia

Загреб, Хорватія

Kalchenko V. V., Dr. Tech. Sciences, Prof., ChNTU, Ukraine

Кальченко В. В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна

Klymenko S. A., Dr. Tech. Sciences, Corresponding member of the

Клименко С. А., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України

National Academy of Sciences of Ukraine,

Ковальов В. Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Kovalev V. D., Dr. Tech. Sciences, Prof., DSEA, Ukraine

Купріянов О. В., д-р техн. наук, проф., ННІ «УПА»

Kupriyanov O. V., Dr. Tech. Sciences, Prof., ERI "UEPA" of

ХНУ ім. В. Н. Каразіна, Україна

V. N. Karazin KhNU, Ukraine

Мироненко Є. В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Myronenko E. V., Dr. Tech. Sciences, Prof., DSEA, Ukraine

Михал Балол (Балог, Михал), доц., д-р філософії

Balog, Mikhal, associate professor, Doctor of Philosophy,

Технічний університет у Кошицях, Словаччина

Košice Technical University, Slovakia

Новіков Ф. В. д-р техн. наук, проф., ХНЕУ ім. С. Кузнеця

Novikov F. V. Dr. Tech. of Sciences, prof., S. Kuznets KhNUE

Пасичник В. А., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Pasichnyk V. A., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Роп'як Л. Я., д-р техн. наук, проф., ІФНТУНГ, Україна

Ropyak L. Ya., Dr. Tech. Sciences, Prof., IFNTUNG, Ukraine

Сталінський Д. В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ

Stalinsky D. V., Dr. Tech. of Sciences, Prof., SE UkrNTC

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

"ENERGOSTAL", Ukraine

Степанов М. С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Stepanov M. S., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Ступницький В. М., д-р техн. наук, проф., НУ «Львівська політехніка»

Stupnytskyi V. M., Dr. Tech. Sciences, Prof., NU "Lviv Polytechnic"

Фадєєв В. А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Fadeev V. A., Dr. Tech. Science, Prof., PJSC "FED", Ukraine

Хавін Г. Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Khavin G. L., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 9 від 28 квітня 2025р., ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).

R. MYGUSHCHENKO, O. KROPACHEK, O. FINOHENOV, T. POLIAKOVA

RESEARCH ON SIGNAL COMPENSATION PROCESSES IN THERMAL INDUSTRIAL OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

The article examines a thermal industrial object with distributed temperature parameters. An information-geometric model based on transfer functions has been developed for the industrial object and a mathematical model has been determined. Additionally, a cross-coupling compensator has been synthesized. Sequential logarithmic identification method was used and studied to formulate the mathematical model of the object. Transmission coefficients, transport delay and time constants for each transfer function of the information-geometric model were calculated during this process. A compensator for three temperature channels was synthesized using matrix calculus approaches from linear algebra. Given the computational complexity of calculations, the authors developed and utilized specialized software capable of automatically real-time identification of smooth aperiodic transient responses and automatically synthesizing a cross-coupling compensator in real-time. The Einstein digital temperature converter set was used for this purpose. It was assembled into a measurement channel with a digital output and a USB interface. The authors also investigated temperature stabilization channels in the studied industrial object using a PID controller and a relay actuator. A mathematical study of the amplitude and period of self-oscillations across the three control channels was conducted determining the impact of transport delay on the amplitude and period of temperature signal oscillations. Future research is planned for different types of industrial objects characterized by different transfer functions, specifically those involving high-frequency vibration processes. Vibration and its derivatives, namely vibrational displacement, velocity, and acceleration along with temperature, are among the most commonly monitored parameters in industrial applications.

Key words: industrial technological object, mathematical model, cross-coupling compensator, practical identification, temperature stabilization, regulator, transfer function, transient response

Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, О. М. ФІНОГЕНОВ, Т. Л. ПОЛЯКОВА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ СИГНАЛІВ У ТЕПЛОВИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

У статті обраний і досліджений тепловий промисловий об'єкт з розподіленими температурними параметрами. Для промислового об'єкту побудована інформаційно-геометрична модель, що базується на передавальних функціях, визначена математична модель, синтезований компенсатор перехресних зв'язків. Для формування математичної моделі об'єкту використаний і досліджений метод послідовного логарифмування практичної ідентифікації, у ході якого були розраховані коефіцієнти передачі, транспортне запізнення та сталі часу кожної передавальної функції інформаційно-геометричної моделі. Використовуючи підходи матричного числення лінійної алгебри був синтезований компенсатор для трьох температурних каналів. Через велику надмірність розрахунків авторами створене і використане спеціалізоване програмне забезпечення, яке спроможне автоматично проводити практичну ідентифікацію гладких аперіодичних перехідних характеристик в тестовому он-лайн режимі і автоматично синтезувати компенсатор перехресних зв'язків у режимі реального часу. Для цього використовувався комплект цифрового перетворювача температури Einstein, який зібраний у вимірювальний канал з цифровим виходом і USB вихідним портом. Авторами досліджені канали стабілізації температури в досліджуваному промисловому об'єкті з ПІД-регулятором і релейним виконавчим елементом. Здійснене математичне дослідження амплітуди і періоду автоколивань по трьом каналам управління, визначений вплив транспортного запізнення на значення амплітуди і періоду автоколивань температурних сигналів. Подальші дослідження заплановано провести з іншим типом промислових об'єктів які характеризуються іншими передавальними функціями, а саме з вібраційними високочастотними процесами. Вібрація і її похідні – вібропереміщення, віброшвидкість, віброприскорення, як і температура – є найбільш вживаними параметрами в промисловості.

Ключові слова: промисловий технологічний об'єкт, математична модель, компенсатор перехресних зв'язків, практична ідентифікація, стабілізація температури, регулятор, передавальна функція, перехідна характеристика

Introduction. Modern industrial automation tools play a crucial role in enabling these objects to carry out technological processes. Precise control in such systems is essential for achieving key performance parameters such as minimal regulation error and high responsiveness [1, 2].

The development of control systems based on the main synthesis algorithm includes the following steps [3, 4]:

- selecting the object of study and analyzing its parameters;
- constructing an information model of the object, where the object is generally represented as a «black box»;
- classifying all signals affecting the object according to the principle: observable and controllable; observable and uncontrollable; unobservable and uncontrollable;
- identifying the primary physical parameters from the observable and controllable signals for mathematical analysis and achieving the target function in control;
- performing simulation modeling;
- creating an experimental prototype of the control system.

Another important aspect in developing industrial control systems is choosing an appropriate mathematical model structure [5]:

- object with lumped parameters;
- object with distributed parameters.

Since all industrial technological systems exhibit distributed parameters, while control system theory is based on working with objects with lumped parameters, there is a practical need to represent the studied object as an object with lumped parameters while highlighting cross-coupling [6]. The identification and compensation of cross-coupling influences are crucial tasks for achieving the highest control performance.

As the object of study, the authors selected an object from the series of multi-zone tunnel-type systems [7], where the distribution of both physical and geometric parameters is clearly evident. The selected object [7] is shown in Fig. 1.

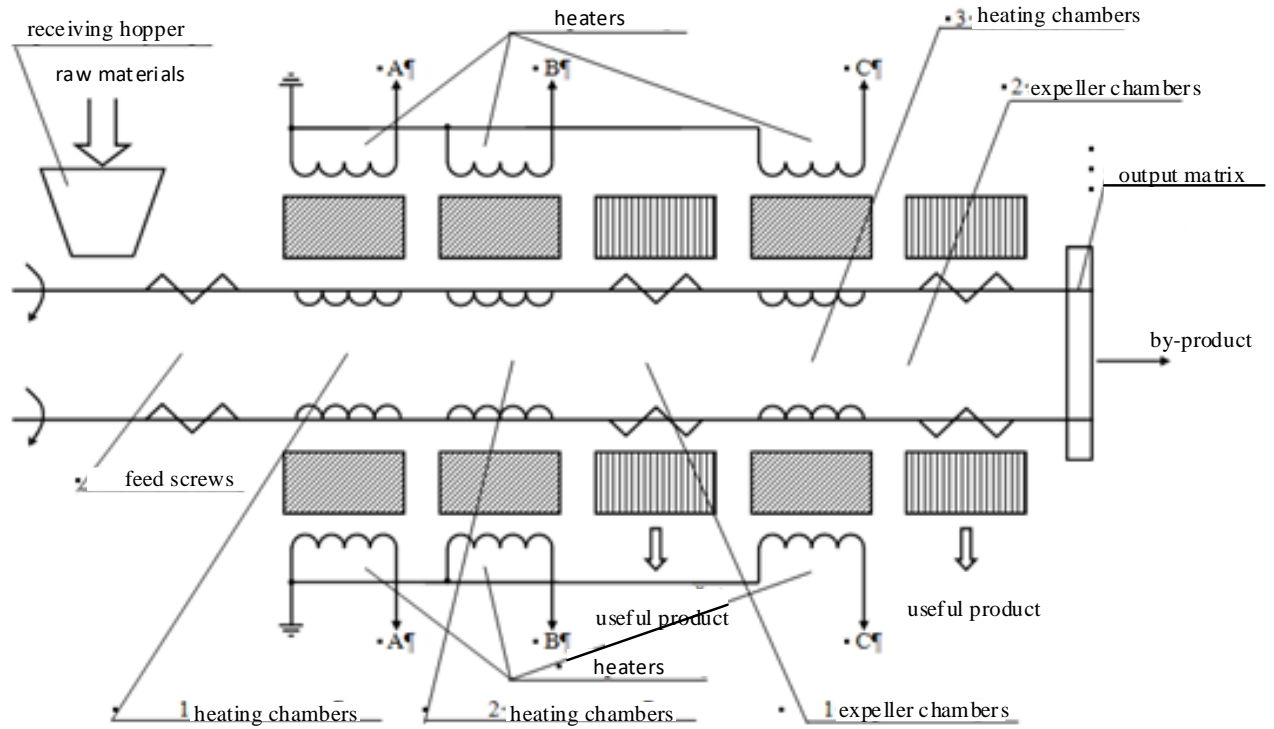


Fig. 1 – Multi-zone tunnel-type technological unit

The industrial technological object [7, 8] shown in Fig. 1 is designed for obtaining vegetable oils from oilseed agricultural crops consisting of:

- a receiving hopper;
- feed screws;
- three heating chambers;
- two expeller chambers;
- an output matrix.

The quality of the final product from such an industrial technological object directly depends on the stability of maintaining the set temperatures in the heating chambers [7].

In [9], an information-geometric model of the object shown in Fig. 1 is presented and depicted in Fig. 2.

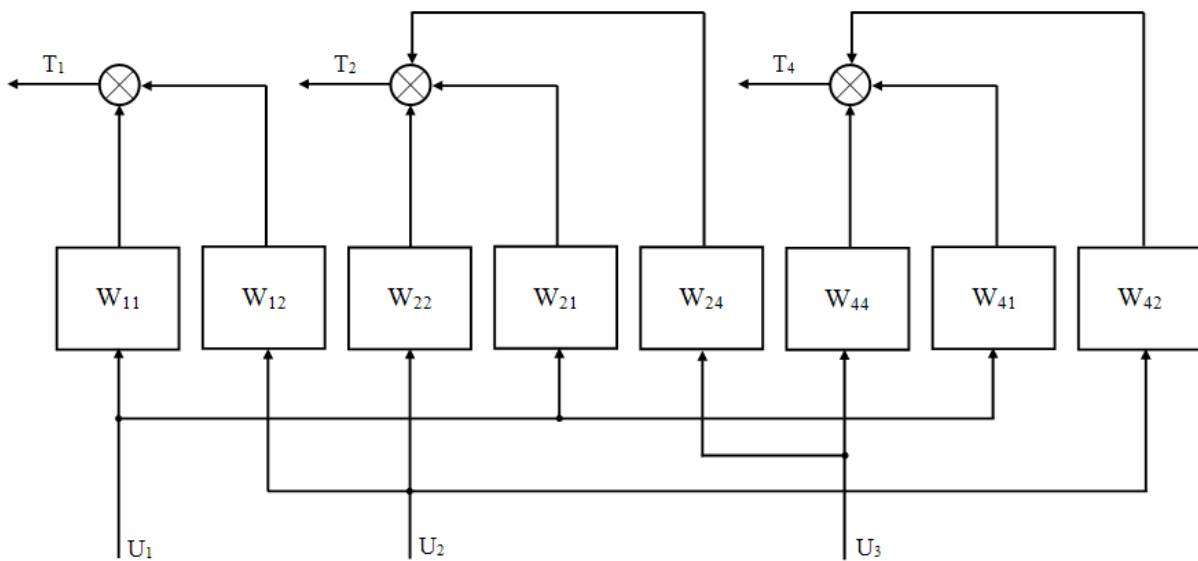


Fig. 2 – information-geometric model of the object:

U – input signals; T – output signals; W_{ii} , W_{ij} – transfer functions

The information-geometric model of the object in Fig. 2 is presented in the form of a schematic representation with transfer functions W_{ii} , W_{ij} and is obtained through the discretization of control disturbances.

In [7, 9], a mathematical model of the considered object is obtained through practical identification:

$$W_O = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

in the form of:

$$W_O = \begin{bmatrix} \frac{44.6e^{-0.4p}}{(1+5.9p)(1+2.9p)} & \frac{6.9e^{-6.5p}}{(1+9.5p)(1+2.0p)} & 0 \\ \frac{6.3e^{-5.3p}}{(1+12.6p)(1+4.0p)} & \frac{64.2e^{-0.2}}{(1+3.2p)(1+1.7p)} & \frac{1.0e^{-21.0p}}{(1+14.1p)(1+4.4p)} \\ \frac{5e^{-12.1}}{(1+11.5p)(1+3.6p)} & \frac{6.1e^{-7.8p}}{(1+9.7p)(1+6.8p)} & \frac{45.2e^{-0.1p}}{(1+2.6p)(1+3.4p)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

In models (1) and (2):

W_{ii} represents the transfer functions of direct influences (useful signals);

W_{ij} represents the transfer functions of cross influences (undesirable signals).

To construct a highly accurate control system for the studied object, it is necessary to eliminate the W_{ij} elements, which can be practically achieved through compensator synthesis.

Research objective and problem statement. The primary objective of this study is the synthesis of a cross-coupling compensator in the thermal information-geometric model of an industrial multi-zone tunnel-type technological unit.

To achieve this objective, the following tasks must be completed:

- study the thermal information-geometric model of the investigated object;
- evaluate the validity of using practical identification methods to obtain the mathematical model of the studied object;
- select a scheme for incorporating the cross-link compensator;
- develop an algorithm for the synthesis of the compensator for an object with distributed temperature parameters;
- calculate and analyze the cross-coupling compensator;
- assess the accuracy of temperature stabilization by integrating a PID controller into the i^{th} channel.

Conducting research on selecting practical identification method. As the practical identification method, the study [7] selected the sequential logarithmization method. The sequential logarithmization method is used for identifying smooth non-oscillatory transient characteristics, represented by the following expression [10]:

$$h(t) \approx c_0 - \sum_{i=1}^n c_i e^{-\alpha_i t},$$

where $c_0 = h_\infty \approx h(T_y)$, c_i and α_i – real numbers, where the roots of the characteristic equation α_i must satisfy the empirical inequality.

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}} \leq 0.5 \div 0.7; \quad i = 1, 2, \dots, n-1.$$

These conditions imply that the transfer function $W(p)$ has only simple poles, which are located at a sufficiently large distance from each other along the real axis.

The core idea of the method is the sequential approximation of transient characteristics $h(t)$, initially by solving a first-order equation, i.e., using the function $c_1 e^{-\alpha_1 t}$. If this approximation is unsatisfactory, a second component $c_2 e^{-\alpha_2 t}$ is introduced, meaning the order of the approximating equation is taken as 2, and so on. The unknown parameters c_i and α_i are determined at each stage of the approximation through the logarithmization operation, which is why this method is called the sequential logarithmization method. The sequence of actions for its application is as follows:

1. An experiment is conducted to obtain the transient characteristic of the thermal object.
2. The discretization time Δt is determined.

3. A tabular dependency $T_i^\circ = f(t_i)$ is constructed.
4. A graphical dependency $T^\circ = f(t)$ is constructed.
5. The pure delay time τ is truncated.
6. The pure delay time k . $k = \frac{T_{ycm}^\circ}{A_{ex}}$ is truncated.
7. A tabular dependence $|h_1|_i = f(t_i)$ $|h_1|_i = T_{ycm}^\circ - T_i^\circ$ is constructed.
8. A tabular dependence $lg|h_1|_i = f(t_i)$ is constructed.
9. A graphical dependence $lg|h_1| = f(t)$ is constructed.
10. An asymptote to the dependence $lg|h_1| = f(t)$ is performed when $t \rightarrow \infty$.
11. The parameters $lg c_1$ and t_1 are determined.
12. The parameter α_1 . $\alpha_1 = \frac{lg c_1}{t_1}$ is determined.
13. The time constant T_1 . $T_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ is determined.
14. A tabular dependence $c_i = c_1 e^{-\alpha_1 t_i}$ is constructed.
15. A tabular dependence $|h_2|_i = |h_1|_i - c_i e^{-\alpha_1 t_i}$ is constructed.
16. The numerical values of the residual functions $|h_2|_i$ are evaluated, after which the order of the transfer function $W(p)$ is determined.
17. Steps 8–16 of this algorithm are repeated.
18. An iterative process is carried out until the residual functions $|h_j|_i \approx 0$ satisfy the required conditions across the entire time range.
19. The transfer function (mathematical model) is expressed as [7]:

$$W(p) = \frac{k}{(1 + pT_1)(1 + pT_2) \dots (1 + pT_n)} e^{-p\tau}.$$

The algorithm is graphically represented in Fig. 3.

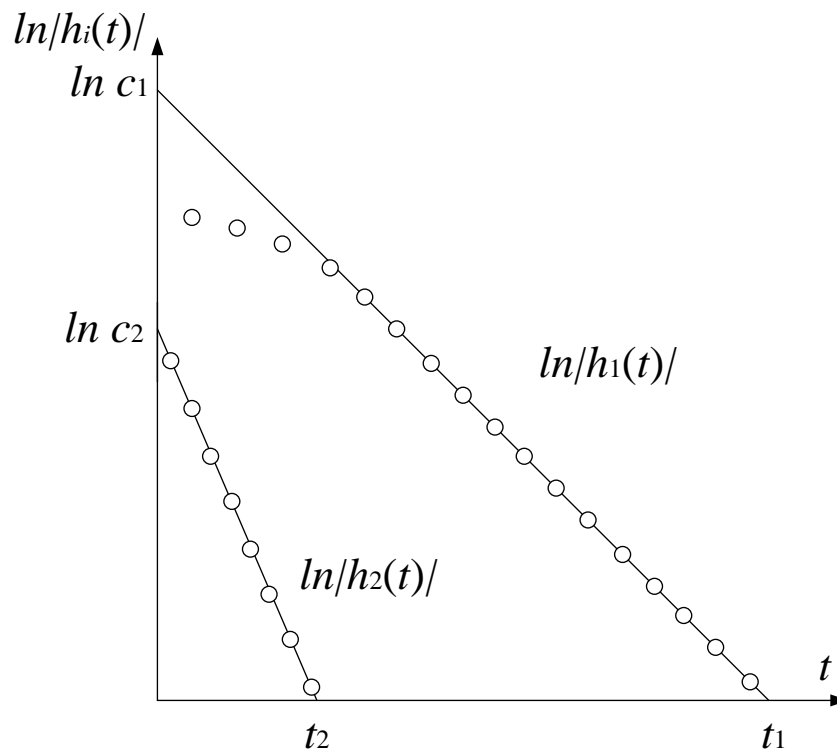


Fig. 3 – Graphical interpretation of the sequential logarithmization method.

The practical application of the sequential logarithmization method for determining dynamic characteristics based on the transient responses of industrial objects shows that $h(t)$ can be approximated by a sum of two to four exponentials [11]. It should be noted that the determination of the coefficients c_i and roots α_i is carried out based on the transient response, from which the pure delay time τ has already been extracted and the transfer coefficient k has been determined.

The authors, under laboratory conditions, have demonstrated the feasibility of using the sequential logarithmization method [12] (Fig. 4) to obtain a mathematical model in the form of:

$$W(p) = \frac{k}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)} e^{-p\tau}, \tag{3}$$

where

- k – transfer coefficient;
- T_i – time constants;
- τ – transport delay.

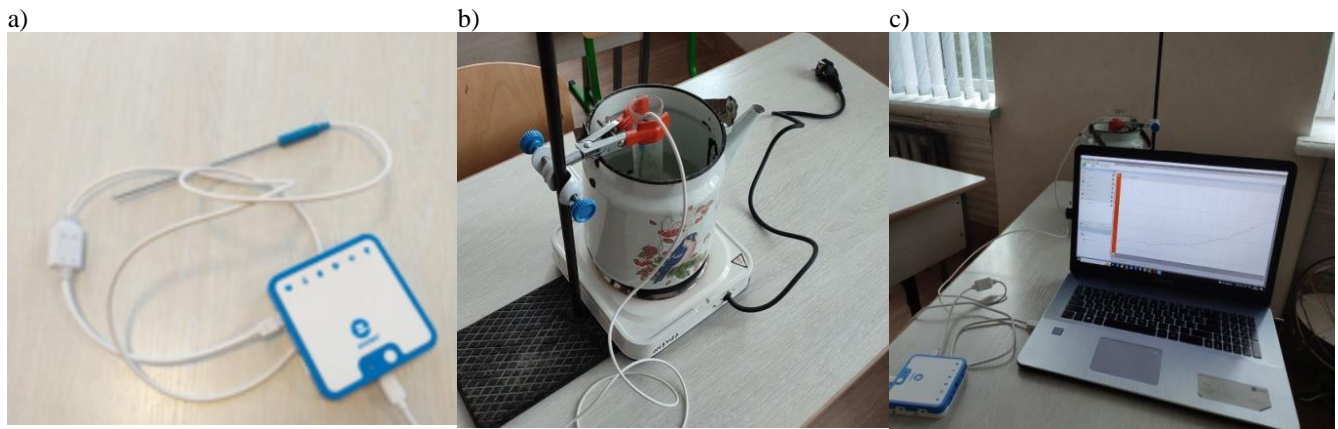


Fig. 4 – Application of the sequential logarithmization method in laboratory conditions:
 a) temperature sensor with a copper-sensitive element;
 b) laboratory setup of the thermal object;
 c) Setup for recording transient characteristics

Synthesis of cross-coupling compensator. To compensate for cross-coupling, a compensator model needs to be introduced into the model of the studied object [13]. The compensator is integrated sequentially into the transfer function of the object. Essentially, two approaches to implementing the compensator can be considered [14] (Fig. 5).

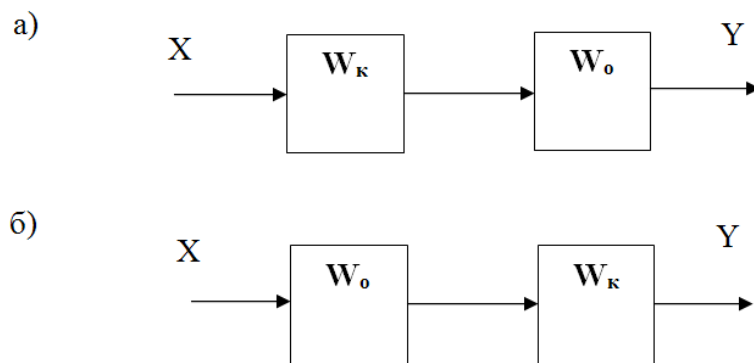


Fig. 5 – Compensator connection schemes

The first compensator implementation scheme (Fig. 5a) is designed to decouple the channels of any multi-connected system using a local controller and is typically applied in closed-loop systems. The second scheme (Fig. 5b) compensates for cross influences by automatically introducing appropriate corrections and is used in open-loop systems [14].

Both schemes have advantages and disadvantages. Since the scheme in Fig. 5b is more versatile, it is recommended as the primary approach.

Introducing a compensator using the scheme in Fig. 5b for channel decoupling should transform the studied object from the form (1) into the following form:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & 0 \\ 0 & W_{22} & 0 \\ 0 & 0 & W_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

when only the main diagonal elements of the matrix remain in the model, while all off-diagonal elements are reduced to zero

to achieve such compensation, it is advisable to use the algorithm from [15], according to which:

$$W_{\kappa}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{\Delta} & \frac{b_{12}}{\Delta} & \frac{b_{13}}{\Delta} \\ \frac{b_{21}}{\Delta} & \frac{b_{22}}{\Delta} & \frac{b_{23}}{\Delta} \\ \frac{b_{31}}{\Delta} & \frac{b_{32}}{\Delta} & \frac{b_{33}}{\Delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & 0 \\ 0 & W_{22} & 0 \\ 0 & 0 & W_{33} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

B (5):

- b_{ij} – algebraic complements of the elements $[W_0]_{ji}$ of the model (1);
- Δ – determinant of the model (1).

The implementation procedure of (5), according to [13], is defined through equations for open-loop systems

$$W_0(p) W_{\kappa}(p) = \text{diag} W_0(p) = W_{\Sigma}(p)$$

Having the following form:

$$W_{\kappa}(p) = W_0^{-1}(p) \text{diag} W_0(p), \quad (6)$$

where $W_{\kappa}(p)$, $W_0(p)$, $\text{diag} W_0(p)$ – dynamic models of the compensator, the object without compensation and the object with cross-coupling compensation, respectively

Based on (6), the compensator model takes the following form

$$W_{\kappa}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{11} W_{11}}{\Delta} & \frac{b_{12} W_{22}}{\Delta} & \frac{b_{13} W_{33}}{\Delta} \\ \frac{b_{21} W_{11}}{\Delta} & \frac{b_{22} W_{22}}{\Delta} & \frac{b_{23} W_{33}}{\Delta} \\ \frac{b_{31} W_{11}}{\Delta} & \frac{b_{32} W_{22}}{\Delta} & \frac{b_{33} W_{33}}{\Delta} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

And the compensation model for the channels, respectively, is as follows:

$$W_{\kappa 1}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{\Delta} W_{11} \\ \frac{b_{12}}{\Delta} W_{22} \\ \frac{b_{31}}{\Delta} W_{33} \end{bmatrix}, \quad W_{\kappa 2}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{21}}{\Delta} W_{11} \\ \frac{b_{22}}{\Delta} W_{22} \\ \frac{b_{23}}{\Delta} W_{33} \end{bmatrix}, \quad W_{\kappa 3}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{31}}{\Delta} W_{11} \\ \frac{b_{32}}{\Delta} W_{22} \\ \frac{b_{33}}{\Delta} W_{33} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

For the original model (2) of the studied object, equation (5) takes the following form:

$$W_{\kappa} = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{\Delta} & \frac{b_{12}}{\Delta} & \frac{b_{13}}{\Delta} \\ \frac{b_{21}}{\Delta} & \frac{b_{22}}{\Delta} & \frac{b_{23}}{\Delta} \\ \frac{b_{31}}{\Delta} & \frac{b_{32}}{\Delta} & \frac{b_{33}}{\Delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{44.6 \cdot e^{-24p}}{(147p+1)(354p+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{64.2 \cdot e^{-12p}}{(192p+1)(102p+1)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{45.6 \cdot e^{-6p}}{(156p+1)(204p+1)} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

The results of calculating the elements of the left matrix in (9) are summarized in Table 1.

Table 1 – The results of calculating the elements of the left matrix in (9)

| Element | Calculation results |
|-------------------------|--|
| $\frac{b_{11}}{\Delta}$ | $-50e^{10.8p}(2p+1)\dots(63p+5)(4.16 \cdot 10^6p - 1.81 \cdot 10^8e^{28.5p} - 6.35 \cdot 10^9pe^{28.5p} + \dots + 3.81 \cdot 10^5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{12}}{\Delta}$ | $-15590e^{33.0p}(4p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{13}}{\Delta}$ | $690e^{12.1p}(4p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{21}}{\Delta}$ | $5e^{6.5p}(2p+1)\dots(59p+10)(1.41 \cdot 10^6p - 3.56 \cdot 10^6e^{27.7p} - \dots + 62500) / \Delta$ |
| $\frac{b_{22}}{\Delta}$ | $5.04 \cdot 10^6e^{39.1p}(2p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{23}}{\Delta}$ | $-2.23 \cdot 10^5e^{18.2p}(2p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{31}}{\Delta}$ | $7.5e^{26.5p}(2p+1)\dots(59p+10)(1.28 \cdot 10^7p - 5.35 \cdot 10^6e^{0.8p} - \dots + 6.41 \cdot 10^5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{32}}{\Delta}$ | $10e^{21p}(4p+1)\dots(63p+5)(8.73 \cdot 10^6p - 2.72 \cdot 10^6e^{10.4p} - \dots + 3.45 \cdot 10^5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{33}}{\Delta}$ | $-0.3e^{27.8p}(17p+5)\dots(97p+10)(13p+5)(9.93 \cdot 10^7p - 4.77 \cdot 10^8e^{11.2p} - \dots + 7.25 \cdot 10^6) / \Delta$ |
| Δ | $5.69 \cdot 10^{13}p + 4.04 \cdot 10^{15}e^{38.9p} - 8.5 \cdot 10^{12}e^{10.4p} - \dots + 1.08 \cdot 10^{12}$ |

Table 2 presents the elements of the compensator according to expression (7).

Table 2 – The results of calculating the compensator elements according to (7)

| Element | Calculation results |
|-------------------------------|--|
| $\frac{b_{11}W_{11}}{\Delta}$ | $-5.965 \cdot 10^8e^{15.5p}(2p+1)\dots(63p+5)(2.535 \cdot 10^8p - 8.198 \cdot 10^{10}e^{36.2p} - \dots + 2.326 \cdot 10^7) / \Delta$ |
| $\frac{b_{12}W_{22}}{\Delta}$ | $-7.99 \cdot 10^{12}e^{37.8p}(4p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{13}W_{33}}{\Delta}$ | $7.822 \cdot 10^9e^{17p}(4p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{21}W_{11}}{\Delta}$ | $2.164 \cdot 10^8e^{13.9p}(2p+1)\dots(59p+10)(1.766 \cdot 10^7p - 4.022 \cdot 10^8e^{39.7p} - \dots + 7.812 \cdot 10^5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{22}W_{22}}{\Delta}$ | $1.956 \cdot 10^{16}e^{51.7p}(2p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{23}W_{33}}{\Delta}$ | $-1.915 \cdot 10^{13}e^{30.9p}(2p+1)\dots(63p+5) / \Delta$ |
| $\frac{b_{31}W_{11}}{\Delta}$ | $-1.291 \cdot 10^9e^{34.7p}(2p+1)\dots(59p+10)(8.854 \cdot 10^9p - 3.907 \cdot 10^7e^{3.5p} - \dots + 2.675 \cdot 10^8) / \Delta$ |
| $\frac{b_{32}W_{22}}{\Delta}$ | $3.895 \cdot 10^8e^{20.8p}(4p+1)\dots(63p+5)(1.833 \cdot 10^8p - 5.822 \cdot 10^8e^{15.5p} - \dots + 7.245 \cdot 10^6) / \Delta$ |
| $\frac{b_{33}W_{33}}{\Delta}$ | $-38310.0e^{39.7p}(34p+5)\dots(97p+10)(1.271 \cdot 10^{11}p - 5.106 \cdot 10^{12}e^{12p} - \dots + 9.281 \cdot 10^9) / \Delta$ |
| Δ | $9.115 \cdot 10^{17}p - 8.88 \cdot 10^{18}e^{39.7p} + 4.89 \cdot 10^{21}e^{51.7p} - \dots + 1.726 \cdot 10^{16}$ |

The channel compensation models, based on (8), are formed from Table 2. The determination of real compensation models, according to (2), using expressions (5), (7), and (8), was carried out with the help of software, the fragments of which are presented below.

The description of the transfer function (2):

```
function w = generate_transfer_function(obj, k, tau, time1, time2)
% Generate the transfer function according to the rule:
% w = (k * exp(-tau*p)) / ((1 + time1*p) * (1 + time2*p))
w = simplify((k * exp(-tau * obj.p)) / ((1 + time1 * obj.p) * (1 + time2 * obj.p)));
end
```

The calculation of the inverse matrix (6):

```
function W_inv = compute_inverse_matrix(obj, numerical)
% Compute the inverse matrix (symbolic or numeric)
W_matrix = obj.functions;
try
det_val = double(subs(det(W_matrix), obj.p, 1));
singular = abs(det_val) < 1e-8;
catch
singular = false; % fallback
end

if singular
W_inv = pinv(W_matrix);
else
W_inv = inv(W_matrix);
End

% Apply symbolic simplification for Laplace context
W_inv = arrayfun(@(x) BaseType.advanced_simplify_laplace(x, obj.p), W_inv);
end
end
```

The calculation of the compensator matrix (7):

```
function W_k = compute_compensator(obj)
% Compute compensator: W_k(p) = diag(W_0(p)) * W_0^-1(p)
W_matrix = obj.functions;
W_diag = diag(diag(W_matrix));
W_inv = obj.compute_inverse_matrix(false); % Use symbolic inversion
W_k = W_diag * W_inv;
end
```

Analytical studies of temperature signals in temperature control systems. Full or partial compensation for the influence of cross-coupling effects on the considered control channel is insufficient for stabilizing the temperature in the corresponding heating chamber. Given that a relay actuator is used for temperature control in any industrial technological object, it is advisable to choose a PID controller as the temperature stabilization regulator, which includes proportional, integral, and derivative components [16]. Such a controller is characterized by the presence of self-oscillations in the steady-state.

When calculating the amplitude and period of the self-oscillations of the temperature signals in the control channels with a PID controller, the transition function is first considered without accounting for transport delay [17]. For this case, the algebraic equation $T=W(p)U$ is implemented with the corresponding transfer function:

$$T_{\tau=0}(p) = \frac{U}{p} \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (9)$$

The original image (9), according to the inverse Laplace transform [19]:

$$T_{\tau=0}(t) = kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-t/T_1} - T_2 e^{-t/T_2}}{T_2 - T_1} \right) + C, \quad (10)$$

where C – the integration constant.

When $\tau=t$ is (10), the expression is following:

$$T_{\tau=0}(t) = kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} \right) + C = -\Delta. \tag{11}$$

From (11), the integration constant is:

$$C = -\Delta - kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} \right). \tag{12}$$

Taking into account (12), equation (10) takes the form:

$$T_{\tau=0}(t) = kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-t/T_1} - T_2 e^{-t/T_2}}{T_2 - T_1} \right) - \Delta - kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} \right) \tag{13}$$

For $t=t_1$, when the temperature oscillation T of the channel reaches its maximum, from (13) we obtain:

$$2\Delta = kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-t_1/T_1} - T_2 e^{-t_1/T_2}}{T_2 - T_1} \right) - kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} \right)$$

Further transformations allow us to obtain t_1 [9]:

$$t_1 = \sqrt{2T_1 T_2 \left(\frac{2\Delta}{kU} + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} + 1 \right)}. \tag{14}$$

Increasing t_1 in (14) by τ , we obtain the half-period of oscillation. Then, the period Q is determined as:

$$Q = 2(t_1 + \tau) = 2 \left[\tau + \sqrt{2T_1 T_2 \left(\frac{2\Delta}{kU} + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} + 1 \right)} \right]. \tag{15}$$

The amplitude of the oscillations A is determined from (13) at $t=0$:

$$A = \Delta + kU \left(1 + \frac{T_1 e^{-\tau/T_1} - T_2 e^{-\tau/T_2}}{T_2 - T_1} \right).$$

The numerical values of the amplitudes and periods of the temperature oscillations in the main channels with the specified parameters Δ are presented in Table 3.

Table 3 – The values of the amplitudes and periods of temperature oscillations

| | $A, ^\circ\text{C}$ | Q, min |
|-----------------|---------------------|-----------------|
| W ₁₁ | 2.19 | 4.39 |
| W ₂₂ | 2.22 | 2.09 |
| W ₃₃ | 2.03 | 2.71 |

The determination of the amplitudes and periods of temperature oscillations (Table 3) was carried out using MathLab 7.11 software. The program fragments are provided below.

The determination of the oscillations amplitude:

```
function A = compute_amplitude(~, varargin)
% Compute amplitude of oscillations
k = varargin{1};
T1 = varargin{2};
T2 = varargin{3};
tau = varargin{4};
delta = varargin{5};
U = varargin{6};
```

```
A = delta + k*U * (1 + (T1 * exp(-tau / T1) - T2 * exp(-tau / T2)) / (T2 - T1));
end
```

The determination of the oscillation period:

```
function Q = compute_period(~, varargin)
% Compute period of oscillations using given formula
tau = varargin{1};
k = varargin{2};
T1 = varargin{3};
T2 = varargin{4};
delta = varargin{5};
U = varargin{6};

Q = 2*(tau + sqrt(2*T1*T2 * ((2*delta/k*U) + (T1 * exp(-tau/T1) - T2*exp(-tau/T2)) / (T2 - T1) + 1)));
end
```

Conclusion. During the research, a cross-coupling compensator was synthesized and the stabilization process of temperature signals in the heating chambers of a multi-zone continuous technological unit was analyzed.

In the course of the study:

- the research object was selected, characterized by a pronounced spatial distribution of temperature parameters.
- the functional scheme of the selected object was analyzed.
- an information-geometric model of the object was considered based on the use of transfer functions.
- the mathematical model of the selected object was identified.

The method of practical identification through sequential logarithmization was chosen as the basis to obtain the mathematical model. This method is best suited for smooth aperiodic transient characteristics without overshoot. The authors refined this method under laboratory conditions. For the experiments, the Einstein primary transducer (sensor) was used. It is integrated into a measurement channel with a digital output and a USB port. The software interface, which queries the port using the appropriate communication protocol, is provided by the manufacturer.

The cross-coupling compensator was synthesized using a well-known algorithm and is based on transforming the distributed mathematical model of the studied industrial object into a lumped-parameter representation. The compensator synthesis employs linear algebraic operations on the mathematical model of the industrial object including the computation of algebraic complements, the determinant and a diagonal matrix.

The synthesis process involves handling large mathematical expressions. To efficiently perform these operations and optimize the resulting expressions, the authors developed and utilized specialized software.

To stabilize the obtained temperature channels and maintain the temperature at predefined levels, a PID controller with a relay actuator is used. Such approaches in temperature stabilization lead to self-oscillatory processes. The authors have studied these self-oscillatory processes, analyzed the contributions of the gain coefficient, time constants, and transport delay, and analytically derived the amplitude and period of these oscillations.

Future research should generalize approaches to the design of cross-coupling compensators, address challenges related to transfer functions of different types (e.g., periodic oscillatory functions) and tackle the problem of automatic mathematical modeling of industrial technological objects and compensators using modern computational techniques.

Bibliography:

1. Таланчук П. М. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / П. М. Таланчук, Ю. О. Скрипник, В. О. Дубровський. – Київ : Райдуга, 1994. – 672 с.
2. Кондрашов С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах: монографія / С. І. Кондрашов. – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – 224 с.
3. Костенко Ю. Т. Системы управления с динамическими моделями / Ю. Т. Костенко, Л. М. Любчик. – Харків : Основа, 1996. – 212 с.
4. Овчаренко О.І. Анализ информационной модели пресс-экструдера масличных культур. / О. І. Овчаренко, Р. П. Мигущенко // Вісник ХДПУ. – 1998. – Вип. 18. – С. 92–94.
5. Многосвязные системы управления / Мееров М. В., Ахметзянов А. В., Бершанский Я. М., Кулибанов В. Н., Левит М. Ю., Першин О. Ю., Черепакхин А. В. / Под ред. М. В. Меерова. –М.: Наука, 1990. – 264 с.
6. Мигущенко Р.П. Аналитические исследования многосвязности процессов в дизель-генераторных установках / Р. П. Мигущенко, В. К. Гусельников, О. Ю. Валуїська // Радіоелектроніка і інформатика. – 2004. – №1.
7. Мигущенко Р. П. Адаптивна система управління багатозонними прохідними технологічними агрегатами: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / Мигущенко Руслан Павлович. – Харків, 2001. – 187 с.
8. Пресс для отжима растительных масел: Патент на изобретение, Роспатент / В.Г. Губарев, В.А. Мельтюхов, В.В. Сулима. – №2057022; Опубл. 27.03.1996.
9. Мигущенко Р. П. Адаптивна система управління багатозонними прохідними технологічними агрегатами: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / Р. П. Мигущенко. – Харків, 2001. – 18 с.
10. Mygushchenko R. Laboratory studies of mathematical models thermal objects / R. Mygushchenko, O. Kropachek, L. Shustik, K. Mygushchenko // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2022. – № 2. – С. 4–11.
11. Мигущенко Р. П. Отримання математичних моделей багатозонних технологічних агрегатів шляхом практичної ідентифікації / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, І. М. Коржов, Т. О. Баранюк // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2022. – № 1. – С. 8–14.
12. Коржов І. М. Пристрій контролю та діагностування стану промислових динамічних об'єктів: дис. докт. філософ.: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Коржов Ігор Михайлович. – Харків, 2020. – 306 с.
13. Рей У. Методы управления технологическими процессами : пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368с.
14. Щапов П. Ф. Теоретичні та практичні засади систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів : монографія / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 260 с.
15. Кропачек О. Ю. Методи і пристрій контролю віброприскорень стінок паливопроводу високого тиску дизельних агрегатів: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Кропачек Ольга Юріївна. – Харків, 2004. – 186 с.
16. Иванов А. О. Теория автоматического управления: підручник / А. О. Иванов. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 250 с.
17. Бурау Н. І. Теория автоматического управления: практикум / Н. І. Бурау, Д. О. Півторак. – Київ : КПІ ім. Сікорського, 2021. – 57 с.

Bibliography (transliterated):

1. Talanchuk P. M. Zasoby vymiriuvannia v avtomatychnykh informatsiinykh ta keruiuchykh systemakh: pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl. / P. M. Talanchuk, Yu. O. Skrypnyk, V. O. Dubrovskiy. – K.: Raiduha, 1994. – 672 s.
2. Kondrashov S. I. Metody pidvyshchennia tochnosti system testovykh vyprobuvan elektrychnykh vymiriuvalnykh peretvoriuvachiv u robochykh rezhymakh: monohrafiia / S. I. Kondrashov. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2004. – 224 s.
3. Kostenko Yu. T. Systemy upravleniia s dynamycheskymy modeliami / Yu. T. Kostenko, L. M. Liubchik. – Kharkiv: Osnova, 1996. – 212 s.
4. Ovcharenko O. I. Analyz ynformatsyonnoi modely press-ekstrudera maslychnykh kultur. / O. I. Ovcharenko, R. P. Myhushchenko // Visnyk KhDPU. – 1998. – Vyp.18. – С.92 – 94.
5. Mnogosviaznye systemy upravleniia / Meerov M.V., Akhmetzianov A.V., Bershchanskyy Ya.M., Kulybanov V.N., Levyt M.Iu., Pershyn O.Iu., Cherepakhyh A.V. / Pod red. M.V. Meerova. –M.: Nauka, 1990. – 264s.
6. Myhushchenko R.P. Analytycheskye yssledovaniia mnogosviaznosti protsessov v dyzel-heneratorynykh ustanovkakh / R. P. Myhushchenko, V. K. Huselnykov, O. Yu. Valuiska // Radioelektronika i informatyka. – 2004. – №1.
7. Myhushchenko R. P. Adaptivna systema upravlinnia bahatozonnyy prokhdnyy tekhnolohichnyy ahreatamy: dys. kand. tekhn. nauk: 05.13.07 / Myhushchenko Ruslan Pavlovych. – Kharkiv, 2001. – 187 s.
8. Press dlia otzhyma rastytelnykh massel: Patent na yzobretenye, Rospatent / V. H. Hubarev, V. A. Meltiukhov, V. V. Sulyma. – №2057022; Opubl. 27.03.1996.
9. Myhushchenko R. P. Adaptivna systema upravlinnia bahatozonnyy prokhdnyy tekhnolohichnyy ahreatamy: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.13.07 / R. P. Myhushchenko. – Kharkiv, 2001. – 18 s.
10. Mygushchenko R. Laboratory studies of mathematical models thermal objects / R. Mygushchenko, O. Kropachek, L. Shustik, K. Mygushchenko // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2022. – № 2. S. 4 – 11.
11. Myhushchenko R. P. Otrymannia matematychnykh modelei bahatozonnykh tekhnolohichnykh ahreatativ shliakhom praktychnoi identyfikatsii / R. P. Myhushchenko, O. Yu. Kropachek, I. M. Korzhov, T. O. Baraniuk // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2022. – № 1. S. 8 – 14.
12. Korzhov I. M. Prystrii kontroliu ta diahnostuvannia stanu promyslovykh dynamichnykh ob'ektiv: dys. dokt. filosof.: 152 – Metrolohiia ta informatsiino-vymiriuvalna tekhnika / Korzhov Ihor Mykhailovych. – Kharkiv, 2020. – 306 s.
13. Rei U. Metody upravleniia tekhnolohycheskymy protsessamy: Per. s anhl. – M.: Myr, 1983. – 368s.
14. Shchapov P. F. Teoretychni ta praktychni zasady system kontroliu ta diahnostuvannia skladnykh promyslovykh ob'ektiv: monohrafiia / P. F. Shchapov, R. P. Myhushchenko, O. Yu. Kropachek. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – 260 s.
15. Kropachek O. Yu. Metody i prystrii kontroliu vibropryskoren stinok palyvoprovodu vysokoho tysku dyzelnykh ahreatativ: dys. kand. tekhn. nauk: 05.11.13 / Kropachek Olha Yuriivna. – Kharkiv, 2004. – 186 s.

16. Ivanov A. O. Teoriia avtomatychnoho keruvannia: pidruchnyk / A. O. Ivanov. – Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet. – 2003. – 250 s.
17. Burau N. I. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia: praktykum / N. I. Burau, D. O. Pivtorak. – K.: KPI im. Sikorskoho. – 2021. – 57 s.

Надійшла (received) 05.04.2025

About the Authors / Відомості про авторів

Mygushchenko Ruslan (Мигущенко Руслан Павлович) – Doctor of Technical Sciences, professor, vice-rector of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-099-40-22-885; e-mail: mrpl@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3287-9772.

Kropachek Olga (Кропачек Ольга Юрївна) – Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-067-79-5678-0; e-mail: kropachek@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5899-0252.

Finohenov Oleksii (Фіногенов Олексій Михайлович) – PhD student of the Department of Information and Measuring Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-066-821-60-21; e-mail: alexey.finohenov@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6707-8511.

Poliakova Tetiana (Полякова Тетяна Леонідівна) – PhD in Philology, associate professor, associate professor of the Department of Intercultural Communication and Foreign Language, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-050-740-84-05; e-mail: tatyana.kharkov@outlook.com, ORCID: 0000-0002-3353-2228.

**О. А. ОХРИМЕНКО, О. О. КЛОЧКО, Ю. М. ГЛАВЧЕВА, В. М. КОРЕНЬКОВ, Д. О. КРАСНОВИД,
В. С. ФЕДОРЕНКО**

ВИХІДНА ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ПОВЕРХНЯ ДИСКОВИХ ФРЕЗ НА БАЗІ ОДНОПОЛОСНОГО ГІПЕРБОЛОІДА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ ЕВОЛЬВЕНТНИХ КОЛІС

В роботі об'єктом дослідження була конструкція дискових збірних зуборізних фрез на базі твердосплавних пластин прямолінійної форми, які формують профіль колеса, що наближений до евольвенти, при чому за рахунок певної установки мінімізуються ці відхилення і такі фрези мають розрахункові відхилення, що наближають їх за точністю до фрез які мають фасонний а не прямолінійний профіль різальної кромки. В основу розрахунку таких фрез було покладено що різальна кромка повинна розташовуватись на прямолінійній твірній гіперboloїду і за рахунок цього можна отримати криволінійний профіль в осьовому перерізі, який буде мати відхилення від евольвенти в межах певного допуску. В роботі розроблено методику визначення параметрів гіперboloїду для заміни евольвентного профілю, досліджено залежність відхилення профілю від евольвенти в залежності від зовнішнього діаметра дискової фрези. За результатами розрахунків отримано, що для зменшення відхилень від евольвенти при такій заміні профілю необхідно використовувати 4 і більше ділянок гіперboloїду з різними параметрами. Розроблена конструкція таких фрез на базі пластин прямолінійної форми без використання фасонних пластин зменшує собівартість такого інструменту. Фрези запропонованої конструкції раціонально використовувати для обробки крупномодульних зубчастих коліс, де собівартість пластин специфічної фасонної форми, є суттєвою в порівнянні з пластинами прямолінійної форми, що значно знижує як експлуатаційні витрати та собівартість при обробці крупномодульних коліс.

Ключові слова: зубчасті колеса, інструмент, евольвента, виготовлення зубчастих коліс, режими різання.

O. OKHRIMENKO, O. KLOCHKO, Yu. HLAVCHEVA, V. KORENKOV, D. KRASNOVID, V. FEDORENKO
INITIAL TOOL SURFACE OF DISC-TYPE MILLING CUTTERS BASED ON A SINGLE-SHEET HYPERBOLOID FOR THE MANUFACTURING OF INVOLUTE GEARS

This study focuses on the design of assembled disc-type gear milling cutters based on straight-edged carbide inserts, which form a gear tooth profile approximated to an involute. By means of a specific insert positioning, these deviations are minimized, resulting in calculated profile errors comparable to those of profile-shape cutters rather than straight-edged ones. The design approach is based on the condition that the cutting edge lies along a straight generatrix of a hyperboloid, allowing the formation of a curved profile in the axial section with deviations from the involute remaining within permissible tolerances.

The paper presents a methodology for determining the hyperboloid parameters to substitute the involute profile. The dependence of profile deviation from the involute is studied as a function of the outer diameter of the disc cutter. According to the computational results, in order to reduce involute deviation when using such profile substitution, it is necessary to employ four or more hyperboloid segments with varying parameters. The developed cutter design, based on straight-edged inserts without using profiled ones, significantly reduces tool manufacturing cost. The proposed cutter design is particularly suitable for machining large-module gears, where the cost of complex-shaped profiled inserts is significantly higher than that of straight-edged ones, thus reducing both operational expenses and machining costs for large-module gears.

Keywords: gear wheels, cutting tool, involute, gear manufacturing, cutting modes

Вступ. Зубчасті колеса є невід'ємною частиною різних машин і механізмів. Від якості виготовлення яких залежить працездатність машини вцілому. Особливо це важливо для машин і механізмів, що використовують зубчасті колеса великого модуля, які призначені для передачі великих навантажень і тому вимоги, до їх ККД що визначаються також точністю їх виготовлення значно більші ніж до зубчастих коліс малих та середніх модулів. Такі зубчасті колеса використовуються в вітрової енергетиці, суднобудуванні, важке машинобудування, транспортне машинобудування та інше.

Параметри точності визначаються саме технологічним процесом їх виготовлення де основним чинником є інструмент, що забезпечує виготовлення зубчастого колеса. На даний час основним способом отримання евольвентного профілю зубчастих коліс великого модуля є черв'ячні та дискові фрези. При чому такі зубчасті колеса в основному виготовляються в рамках одиничного і малосерійного виробництва тому використання черв'ячних фрез не завжди доцільно завдяки своїй великій вартості, яка потім враховується в затрати при виготовленні. У зв'язку з розвитком верстатів з ЧПК на даний час широко почали застосовуватись дискові фасонні фрези евольвентного профілю для виготовлення великогабаритних зубчастих коліс великого модуля 10мм і більше. На даний час багато виробників пропонують різні конструкції дискових евольвентних фрез [1, 2, 3] зі змінними твердосплавними пластинами при чому особливості їхньої конструкції полягають у використанні спеціальних пластин прямолінійної форми для чорнових фрез і пластини фасонної евольвентної форми для фрез призначених для чистової обробки, що відповідно значно підвищує собівартість такого інструменту. Використання непереточуваних різальних пластин (НТП) прямолінійної форми можливо тільки для фрез призначених для чорнової обробки так як вони не дають необхідної точності евольвентного профілю. Про те є роботи [4] описують заміну криволінійного евольвентного профілю вихідною інструментальною поверхнею на базі лінійчастої поверхні, яка в осьовому перерізі дає криволінійний профіль, що має краще наближення до евольвентного ніж його заміна прямою лінією, перевага таких фрез полягає, що їх різальна частина реалізується простою формою НТП, це значно знижує собівартість таких фрез.

В роботі [4] розглядаються тільки пальцеві фрези, а дискові зуборізні фрези мають більше поширення [5, 6, 7, 8] і для них це питання не вирішено.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методики визначення параметрів вихідної інструментальної поверхні (ВІП) дискової зуборізної фрези на базі лінійчастої поверхні гіперboloїда, що буде мати мінімальні відхилення профілю від евольвенти. Це дасть можливість розробити на цій базі конструкцію дискової зуборізної фрези де різальна частина реалізується прямолінійними НТП, що забезпечить зменшення собівартості виготовлення таких фрез та витрат на їх експлуатацію за рахунок використання НТП простої форми без використання спеціальних пластин евольвентного профілю.

Матеріали та методи дослідження

В роботі використовувалися теоретичні методи дослідження, які застосовуються в теорії зубчастих зачеплень, теорії формування поверхонь при механічній обробці [5, 6, 7, 8], теоретичні розрахунки проводилися за допомогою системи автоматизації математичних розрахунків Scilab [11].

Результати дослідження формування зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперboloїда

Цю задачу вирішуємо взявши в якості вихідної інструментальної поверхні (ВІП) для таких фрез лінійчасту поверхню твірна, яких є прямою лінією і може бути утворена різальною кромкою НТП прямолінійної форми і в осьову перерізі такі поверхні мають криволінійну форму, яка наближається до евольвентної кривої, одним із таких є поверхня однополосного гіперboloїду (рис.1).

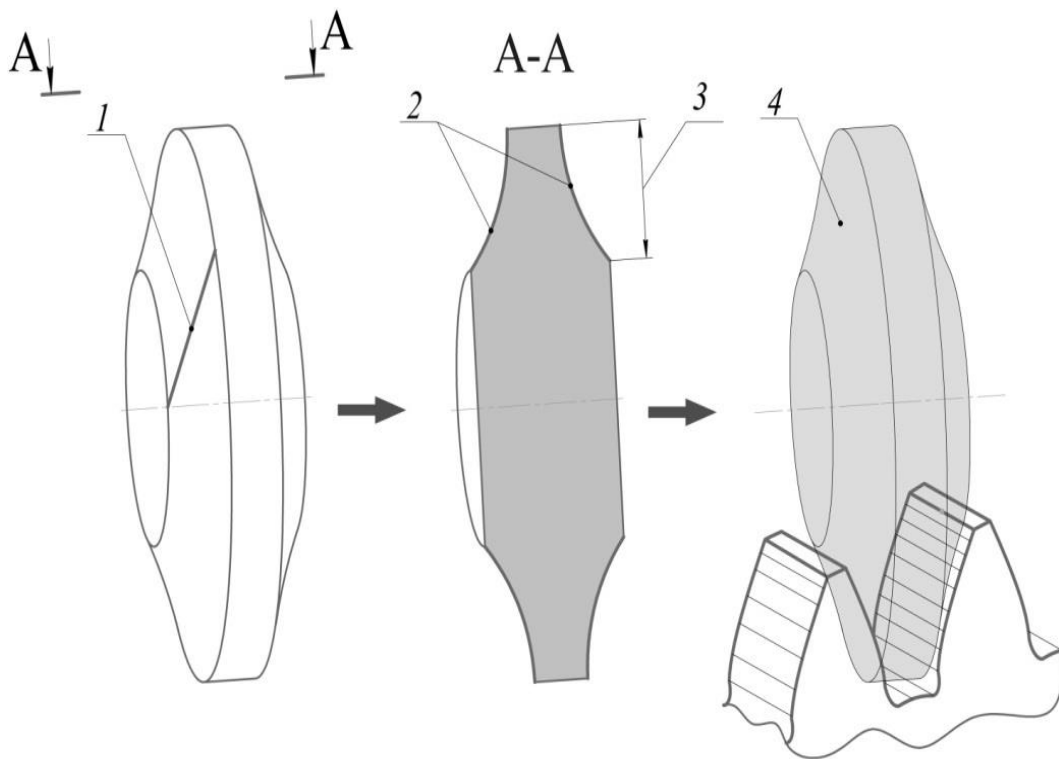


Рис. 1 – Утворення ВІП дискової модульної фрези на базі гіперboloїда: 1-прямолінійна твірна гіперboloїда, 2- криволінійний осьовий переріз гіперboloїда, 3-робоча ділянка гіперboloїда, 4-утворена ВІП гіперboloїда.

Основним завданням є розробка методики та визначення параметрів однополосного гіперboloїду осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від евольвенти при його заміні ВІП дискової модульної фрези.

Для вирішення даної задачі була запропонована наступна розрахункова схема визначення параметрів ВІП пальцевої фрези зі змінними, що потрібно визначити (рис.2).

На схемі наведеної на рис.2.2 в системі координат $S(X, Y, Z)$, яка віссю Z співпадає з віссю зубчастого колеса, вісь X паралельна осі фрези і вісь Y є лінією симетрії западини зубчастого, тоді основними вхідними параметрами є: параметри зубчастого колеса: m - модуль, Z_k - кількість зубів колеса, a_n - кут вихідного контуру зубчастого колеса, x - к-нт зміщення, ΔS - величина зменшення товщини зуба колеса на ділільному діаметрі, звідки розрахунковими параметрами профілю зуба колеса є: r_a - діаметр вершин зубів колеса, r_{akt} - значення радіуса кінцевої точки евольвенти, що потім переходить в перехідну криву зуба, r_d - ділільний радіус колеса, S_n - товщина зуба на ділільному колі r_d , r_f - радіус западин колеса [5].

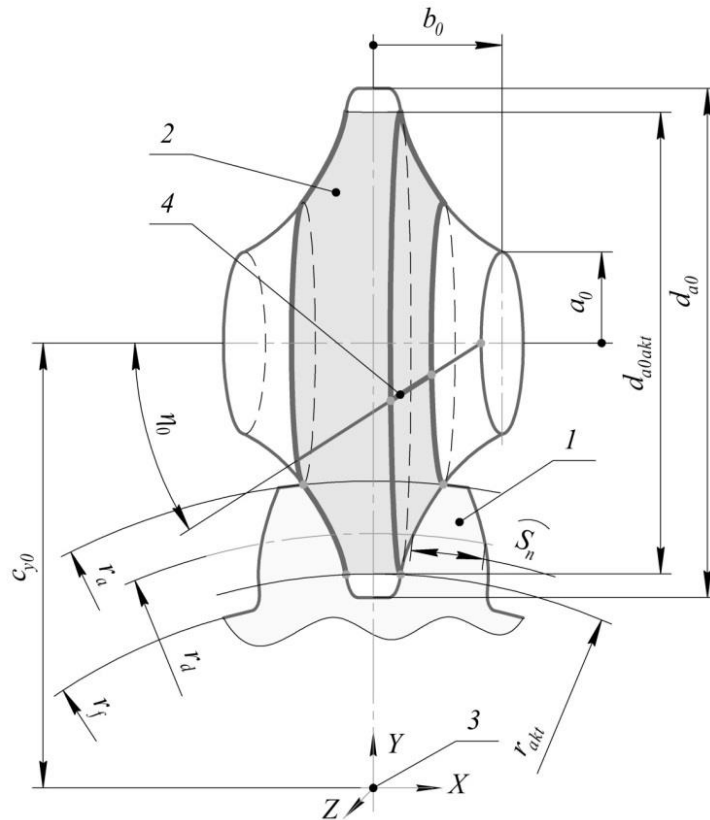


Рис. 2 – Розрахункова схема визначення параметрів ВІП пальцевої фрези на базі гіперболоїда: 1- зубчасте колесо, 2-поверхня гіперболоїда, 3-вісь зубчастого колеса, 4-прямолінійна твірна гіперболоїда.

Розрахункові параметри ВІП пальцевої фрези є (рис.2.2): a_0 – радіус горловини гіперболоїда, b_0 – зміщення площини розташування перерізу горловини гіперболоїда відносно лінії симетрії западини зубчастого колеса, вісь Y , η_0 – кут нахилу твірної гіперболоїда до його осі, c_{y0} – величина зміщення осі фрези відносно осі зубчастого колеса (міжосьова відстань), d_{a0} – діаметр вершин зубів дискової фрези, d_{a0akt} – найбільший діаметр активної частини дискової фрези що формує заміняючий евольвентний профіль зубчастого колеса.

Основна задача полягає у визначенні таких оптимальних параметрів ВІП фрези: a_0, b_0, η_0 , для яких відхилення кривої осьового перерізу ВІП фрези в площині XU було би мінімальне на ділянці профілю зуба, що обмежена значеннями радіусів $r_{akt} \dots r_a$.

Для визначення заданих параметрів спочатку необхідно записати рівняння евольвентної кривої та рівняння перехідної кривої зуба колеса, що обмежує цю криву для цього використаємо залежності описані в [5, 6, 9]:

- евольвентна крива;

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{(0.5\pi m - 2mxtg\alpha_n + \Delta s)}{2r_d}; \theta = tg\alpha_n - \alpha_n; \omega_0 = \omega - \theta \\ \omega_y &= \omega_0 + tg\left(\arccos\left(\frac{r_b}{r_i}\right)\right) - \arccos\left(\frac{r_b}{r_i}\right) \\ x_e &= r_i \sin\omega_y; x_e = r_i \cos\omega_y \end{aligned} \quad (1)$$

де: x_e, y_e – координати точок кривої евольвенти зуба колеса, r_b – радіус основного кола колеса, r_i – радіус точки, що розглядається, який змінюється в межах від r_{akt} до r_a .

- перехідна крива визначається, як крива лінія що утворена рейковим інструментом по схемі формоутворення кочення початкової прямої по початковому колу і визначається, як траєкторія руху вершини рейки, що формоутворює задане зубчасте колесо [5, 6, 9]:

$$\begin{aligned} Y_A &= -1.25m + xm; X_A = \frac{0.5\pi m - 2mxtg\alpha_n + \Delta s}{2} - (1.25m - xm)tg\alpha_n \\ x_p &= (X_A + r_d t)cost - (Y_A + r_d) sint; y_p = (X_A + r_d t) sint + (Y_A + r_d) cost \end{aligned} \quad (2)$$

де: x_p, y_p – координати перехідної кривої зуба колеса, t – кут повороту зубчастого колеса при формуванні перехідної кривої реєчним інструментом.

Сумісне вирішення рівнянь (2.1) та (2.2) дає змогу визначити точку перетину кривої евольвенти (2.1) та перехідної кривої (2.2) і значення r_{akt} радіус кінцевої точки евольвенти (рис 2.3).

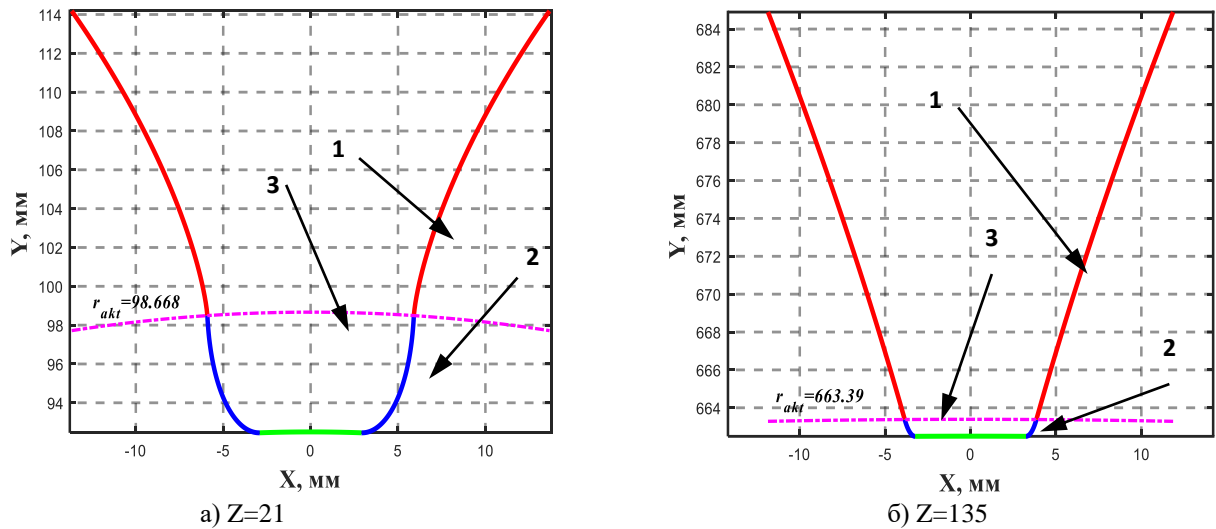


Рис. 3 –Профіль западини зубчастого колеса з радіусом кінцевої точки евольвенти $m=10$, $a_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$: 1-евольвентна крива, 2-перехідна крива западини, 3- радіус граничної точки евольвентної кривої.

Так як задача симетрична, то розв’язувати будемо її відносно правої сторони зуба тоді рівняння поверхні гіперboloїда, що її обробляє запишеться наступним чином відповідно до схеми наведеної рис.2:

$$\begin{aligned} x_G &= -c_0 u + b_0 \\ y_G &= a_0 \cos t_1 + a_0 u \sin t_1 + c_{y0} \\ z_G &= -a_0 \sin t_1 + a_0 u \cos t_1 \\ \operatorname{tg} \eta &= a_0 / c_0 \end{aligned} \tag{3}$$

де: x_G, y_G, z_G – координати точок поверхні гіперboloїда, u – параметр, що відповідає за положення точки на твірній гіперboloїда, t_1 – параметр, що відповідає за кутове положення твірної відносно осі гіперboloїда .
Розрахунок значення c_{y0} міжосьової відстані проводимо за наступною залежністю:

$$c_{y0} = r_f + 0,5d_{a0} \tag{4}$$

Для знаходження відхилень від евольвентного профілю необхідно записати рівняння осьового перерізу гіперboloїда, що описується рівнянням (3):

$$\begin{aligned} x_{G0} &= -c_0 u + b_0 \\ y_{G0} &= (c_{y0} + a_0(-u^2 + \sqrt{1 + u^2}))/\sqrt{1 + 2u^2} \end{aligned} \tag{5}$$

де: x_{G0}, y_{G0} – координати точок кривої осьового перерізу гіперboloїда.

Задача зводиться до порівняння відхилень між точками x_e, y_e координати точок кривої евольвенти зуба колеса та x_{G0}, y_{G0} координатами точок кривої осьового перерізу гіперboloїда в межах робочої ділянки зуба колеса, яка описується радіусами від r_{akt} до r_a і знаходження таких параметрів поверхні гіперboloїду a_0, b_0, c_0 – при яких відхилення двох кривих будуть мінімальні. При порівнянні двох профілів необхідно координати точок, що порівнюються приводити до положення коли вони мають одне значення координати Y точки осьового перерізу гіперboloїду (рис.4), що описуються рівнянням (4) і залежать від параметру u приводяться до цього значення за наступною залежністю:

$$u = \sqrt{(c_{y0} - Y_{E1} + a_0)(c_{y0} - Y_{E1} - a_0)} / a_0 \tag{6}$$

Для знаходження відхилення профілю ВП утвореної гіперболоїдом від евольвентного профілю пропонується наступний алгоритм розв'язку цієї задачі:

- задаємося основними параметрами зубчастого колеса: m - модуль, Z_k - кількість зубів колеса, a_n - кут вихідного контуру зубчастого колеса, x - к-нт зміщення, ΔS - величина зменшення товщини зуба колеса на ділільному діаметрі;
- задаємося основним параметрами дискової фрези: d_{a0} - діаметр вершин зубів дискової фрези;
- розраховуємо значення параметрів профілю зуба колеса: r_a - діаметр вершин зубів колеса, r_d - ділільний радіус колеса, S_n - товщина зуба на ділільному колі r_d , r_f - радіус западин колеса;
- знаходимо граничний радіус точки евольвенти r_{f1} , яка з'єднується з перехідною кривою западини зуба колеса вирішуючи сумісно рівняння (1) та (2);
- задаємося кількістю розрахункових точок на евольвенті мінімальна кількість рекомендується 50 і розраховуємо значення радіусів точок евольвенти, що рівномірно розташовуються в межах від r_{akt} до r_a і за виразом (1) розраховуємо координати точок евольвенти колеса x_{e_i} , y_{e_i} ;
- задаємося значеннями параметрів гіперболоїда a_0 , b_0 , c_0 і розраховуємо значення c_{y0} міжосьової відстані за залежністю (4);
- для кожного значення точок евольвенти радіусом від r_{akt} до r_a за залежністю (6) знаходимо значення параметру u , що буде йому відповідати;
- після цього для кожного значення u знаходимо координати точок осьового перерізу ВП гіперболоїда за залежністю (5) і отримуємо набір точок x_{G0} та y_{G0} ;
- відхилення від евольвенти буде найбільше за абсолютним значенням різниці між координатами y_{G0} та y_e .

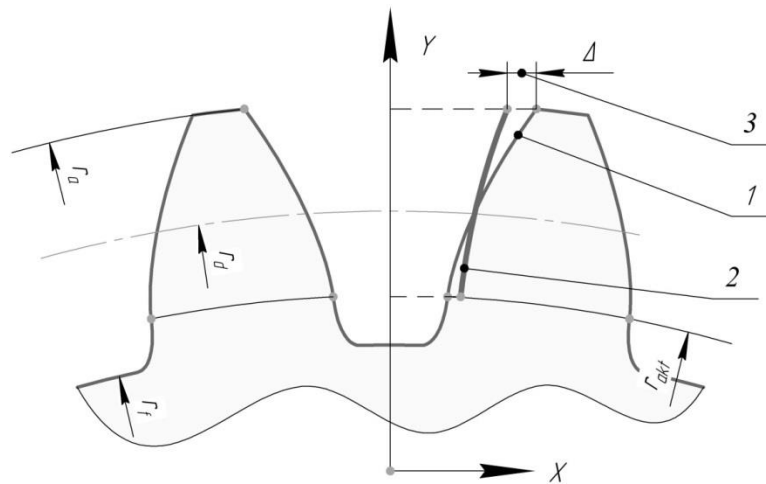


Рис. 4 – Схема порівняння профілів евольвенти колеса з осьовим перерізом ВП гіперболоїда і визначення розрахункового відхилення цих профілів: 1- крива евольвенти, 2 –крива осьового перерізу ВП гіперболоїда, 3- відхилення від евольвенти Δ .

З використання пакету автоматизації математичних розрахунків Scilab була вирішена задача знаходження таких параметрів поверхні гіперболоїду для яких максимальні значення відхилення точок кривої осьового перерізу гіперболоїду від евольвентної ділянки в межах робочої частини були б мінімальні, для цього використовувалася алгоритм, що ґрунтується на підході симплексного алгоритму Нелдера-Міда і є методом прямого пошуку і не використовує жодного складного аналітичного градієнта він відноситься до так званих безградієнтних методів оптимізації.

На рис. 5. наведено геометричну побудову для задачі визначення ВП дискової фрези для зубчастого колеса $m=10$, $Z_k=21$, $d_{a0}=100$.

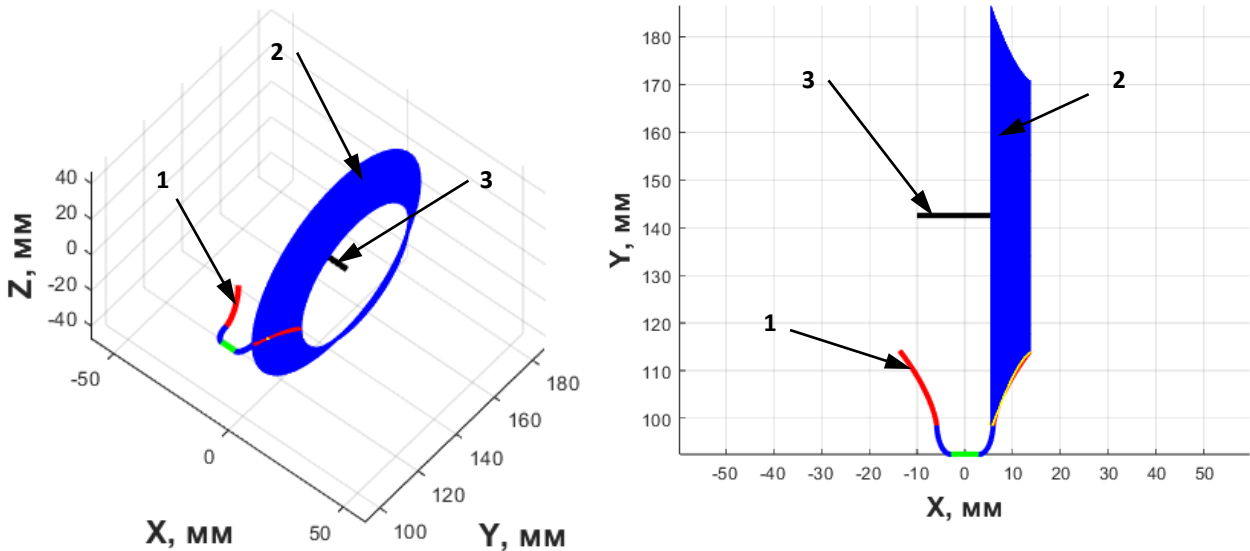


Рис. 5 – Геометрична модель розрахунків для визначення ВІП дискової фрези для зубчастого колеса $m=10, Z=21, d_{a0}=100$. 1- крива профілю зубчастого колеса, 2-ВІП фрези, 3-вісь фрези.

На рис. 6.а показано графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези $d_{a0}=100$ для зубчастого колеса $m=10, a_n=20^\circ, x=0, Z=21$, на рис. 2.6.б $Z=100$. Відповідно отримані значення оптимальних параметрів гіперболоїду для такої заміни будуть для $Z=21$: $a_0= 27.8847, b_0=15.0632, c_0=7.9091$, найбільше відхилення від евольвенти становить $f_f=0.5\text{мм}$ для $Z=100$: $a_0= 22,8936, b_0= 16,5041, c_0= 6.6796$, найбільше відхилення від евольвенти становить $f_f= 0.1064 \text{ мм}$.

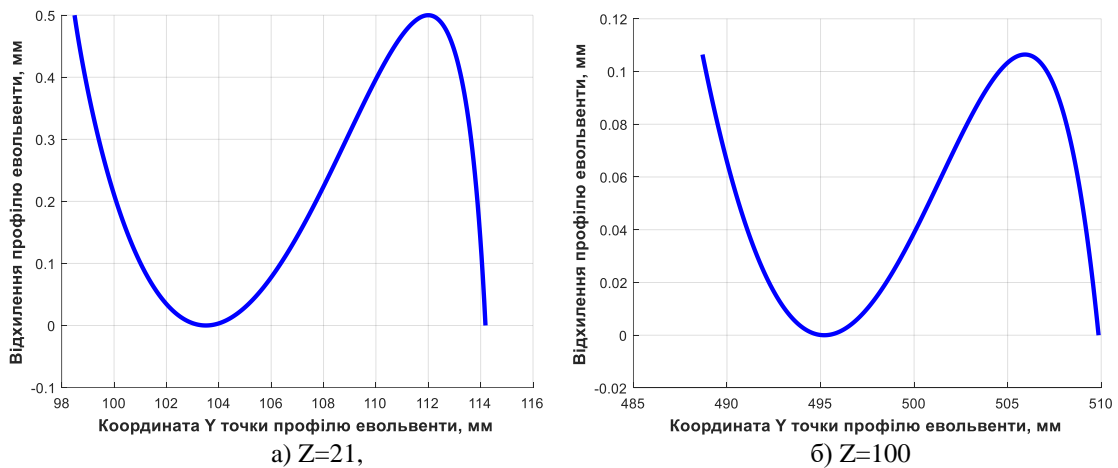


Рис. 6 – Графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези від евольвенти зубчастого колеса з параметрами евольвенти $m=20, a_n=20^\circ, x=0, \Delta S=0$.

При вирішенні задачі оптимізації при знаходженні параметрів гіперболоїду, що забезпечує мінімальні відхилення профілю гіперболоїда від евольвенти стикаємося з проблемою локальних мінімумів цієї задачі при досягненні, яких алгоритм зупиняється при цьому відхилення від евольвенти не є мінімальним, для цього необхідно правильно задавати початкові наближення для оптимізації, а саме a_0, b_0, c_0 , які бажано визначати за наступною залежністю.

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,5d_{a0} - 2m; & b_0 &= (0,68 \dots 0,72)a_0 \\ c_0 &= a_0/\text{tg}(0,5\pi - \text{acos } r_b/r_a) \end{aligned} \quad ;(7)$$

Геометрична інтерпретація цього результату показано на рис.2.6 де відхилення має хвилястий профіль і значення на кінцях профілю відповідають локальним екстремумам на кривій відхилень і їх різниця є максимальним відхиленням від евольвенти, форма такого відхилення формує бочкоподібність на профілю зуба за величиною що дорівнює відхиленню від евольвенти, це є важливим для крупномодульних зубчастих коліс, які працюють під значним навантаженням, що спричинює значні деформації системи зубчасте колесо-вал і для їх компенсації та збільшення строку служби таких коліс використовують саме модифікацію профілю колеса у вигляді бочкоподібності.

На рис. 7, 8 показані результати розрахунків відхилень від евольвенти для дискових фрез модулем 10 мм, 16 мм при різних значення діаметру від номінального для суцільних фрез, що вказані в ГОСТ 10996-64 Фрези дискові зуборізні модульні до значень, що вказані в каталогах фірм [1, 2, 3] і порівняння їх з відхиленнями проявлю зубчастих коліс від евольвенти згідно ГОСТ 1643-81 Передачі зубчасті допуски по 8 ступеню точності так, як відхилення профілю від евольвенти нормується тільки до цього ступеня то з ним будемо і порівнювати, про те ГОСТ 10996-64 такі фрези призначені для зубчастих коліс 10-го ступеню точності.

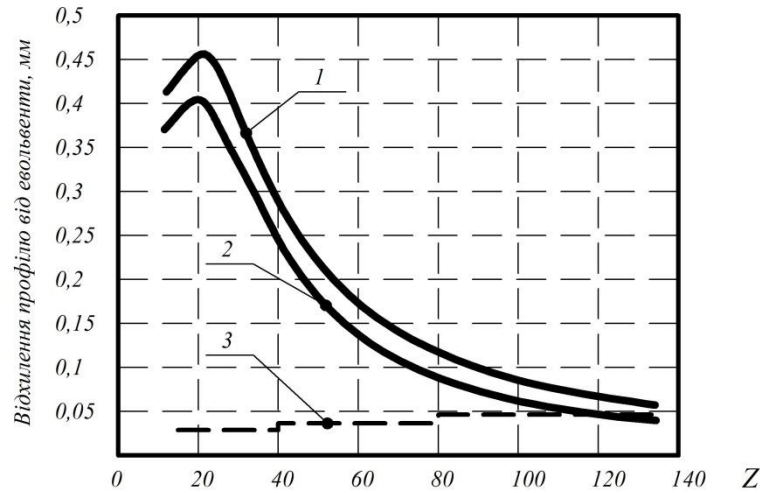


Рис. 7 – Вплив діаметру дискової фрези на відхилення від евольвенти для модуля 10мм: 1 - $d_{a0}=140$, 2- $d_{a0}=350$, 3- допуск відхилення від евольвенти 8 ступеня точності.

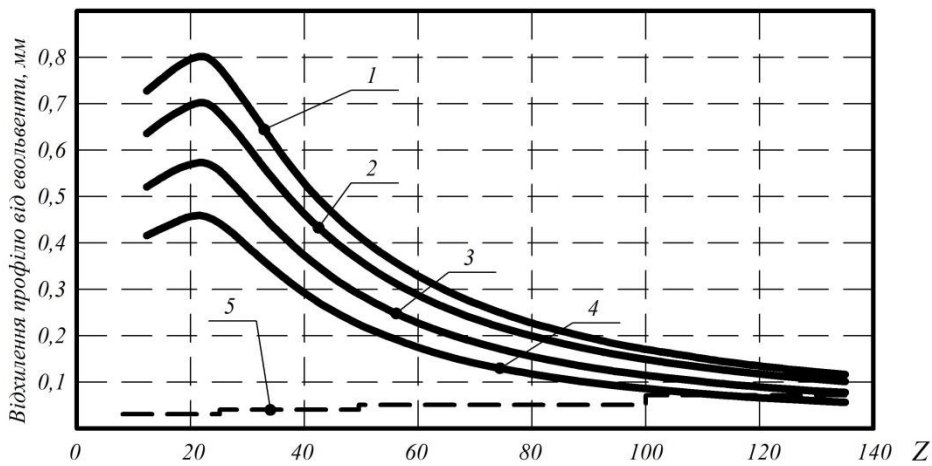


Рис. 8 – Вплив діаметру дискової фрези на відхилення від евольвенти для модуля 16мм: 1 - $d_{a0}=180$, 2- $d_{a0}=270$, 3- $d_{a0}=350$, 4- $d_{a0}=450$, 5- допуск відхилення від евольвенти 8 ступеня точності.

За результатами чисельних розрахунків можна зробити висновок, що збільшення діаметру фрези зменшує значення відхилення від евольвенти (рис.7, 8) про те цього не досить, щоб забезпечити теоретичну точність 8-го ступеня по всьому діапазону чисел зубчастих коліс, а тільки для великих чисел зубів більше 100 і на великих діаметрах фрези рис.7 – крива 2, рис.8 – крива 4, тому такі фрези можуть бути придатні для використання при попереднього чорнового зубофрезерування. Вплив кількості зубів на відхилення профілю показує, що спочатку відхилення зростає і досягає свого екстремуму на кількості зубів 23 а далі падає, це пов'язано з тим що величина активної висоти евольвентної частини зуба зростає від малих чисел зубів до величини 23 так як це пов'язано з формуванням рейкою де висота зуба становить 2.25m, а зі збільшенням кількості зубів кривизна профілю падає і відхилення від евольвенти зменшується. Підвищенням точності таких фрез може бути реалізація ВІП такої фрези з послідовно сполучених гіперболоїдів з різними параметрами які наближають ділянку евольвенти не на всьому профілі, а тільки на певних ділянках. Що можна реалізувати в збірній конструкції фрези з НТП при чому кожна пластина відповідає за свою ділянку наближення рис.9

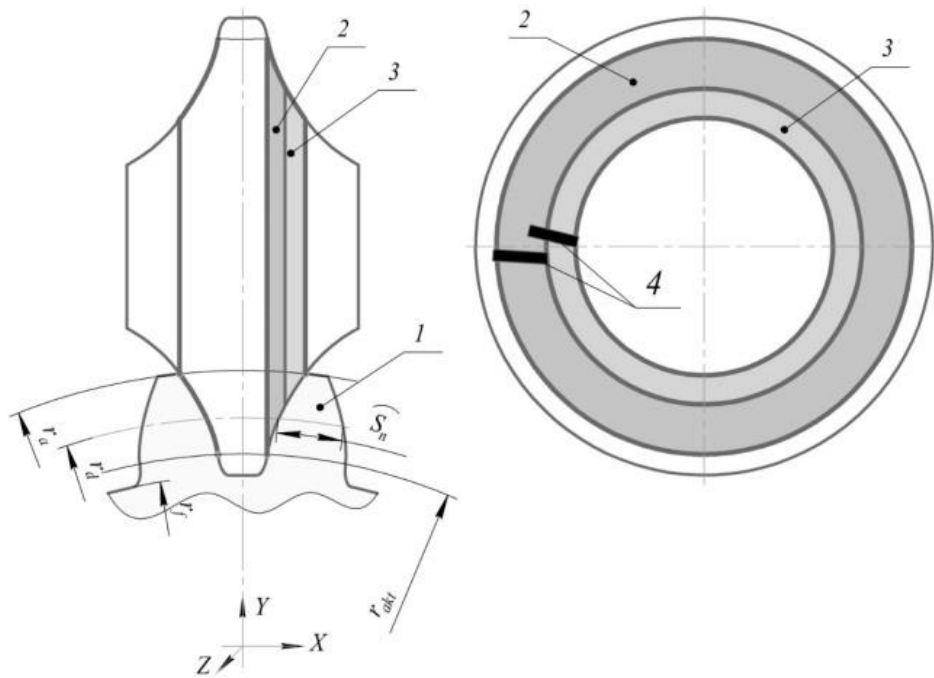


Рис. 9 – Наближення евольвентного профілю зубчастого колеса декількома ділянками гіперболоїду: 1- зубчасте колесо, 2- початкова ділянка гіперболоїду, 3- довільна ділянка гіперболоїду, 4- твёрдосплавні пластини, кромка яких є твірними гіперболоїдів.

Для знаходження параметрів декількох гіперболоїдів, що замінюють евольвентний профіль колеса, за наведеними раніше формулами в розділі 2 проводимо розрахунок параметрів гіперболоїда тільки розбиваємо ділянки зубчастого колеса в межах радіусів від r_{ak1} до r_a на декілька ділянок і для кожного проводимо розрахунок необхідних параметрів. При чому бажано різницю радіусів так обирати, що пластина на одну суміжну ділянку гіперболоїда заходила з перекриттям.

Для прикладу на рис.10 Показано розрахунок відхилень фрези яка складається з трьох ділянок гіперболоїда та в таблиці 2.1 наведено параметри цих гіперболоїдів.

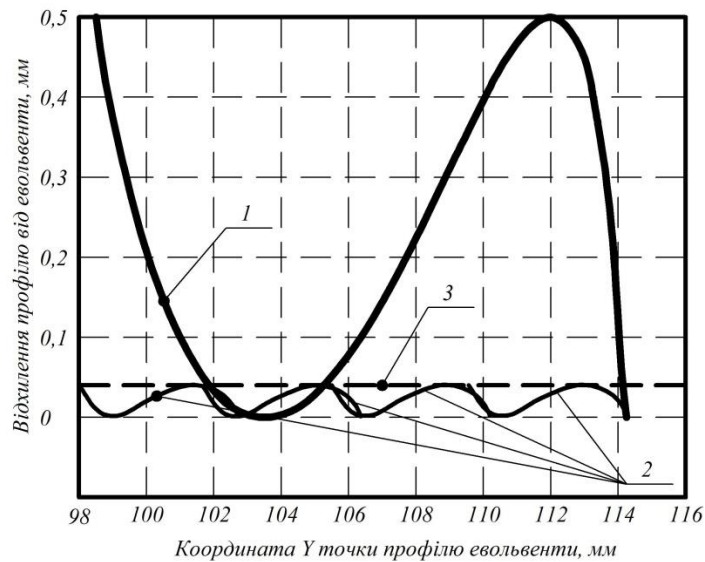


Рис. 10 – Графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези від евольвенти зубчастого колеса з параметрами евольвенти $m=10$, $Z_k=21$, $a_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$, $d_{a0}=350$ мм : 1- відхилення при заміні 1 гіперболоїдом, 2- відхилення при заміні чотирма гіперболоїдами, 3- граничне відхилення кривої евольвенти профілю за 8 ступенем точності.

Таблиця 1 – Параметри гіперболоїдів при заміні евольвентного профілю на 4 частини для $m=10$, $Z_k=21$, $a_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$, $d_{a0}=350$ мм

| Номер ділянки / Параметри гіперболоїда і порівняння з значеннями при заміні 1 ділянкою | Параметри гіперболоїда при заміні 1-ю ділянкою | | |
|--|--|---------------|--------------|
| | $a_0=27.8847$ | $b_0=15.0632$ | $c_0=7.9091$ |
| 1 | 25.8847 | 15,053 | 7,8901 |
| 2 | 26.8723 | 14,023 | 7,023 |
| 3 | 27.9932 | 14.001 | 6,56 |
| 4 | 29,5621 | 13,023 | 6,02 |

Таким чином відповідно до розрахунків рис. 10 шляхом заміни на 4 ділянки гіперболоїдів з різними параметрами можна суттєво зменшити відхилення профілю від евольвенти і таким чином наблизити до показників 8-ого ступеня точності за проведеними розрахунками.

Згідно розрахунків прямолінійна твірна гіперболоїда може бути реалізована в наступній конструкції (рис.11).

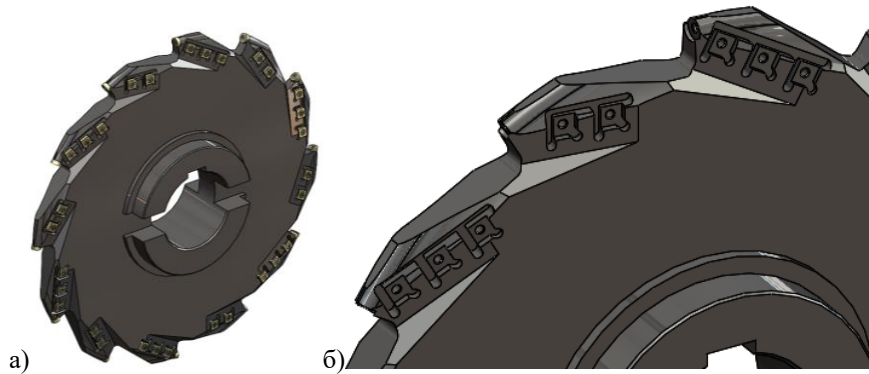


Рис. 11 – Модель дискової збірної фрези на базі гіперболоїду: а) модель фрези, б) корпус фрези з пазами під НПП

Де рис.11.а представлена модель фрези побудована за даними табл. 1, різальна частина проєктована двома видами пластин стандартної форми, вершинна кромка округлою пластиною, бічні кромки пластинами квадратної форми, де їх прямолінійні кромки шляхом відповідного розміщення в корпусі фрези (рис.11.б) формують твірні гіперболоїдів з розрахунковими параметрами. Різальна геометрія бічних частин формується за рахунок повороту пластини навколо твірної гіперболоїда, пластини встановлені групою по 3 та 2 пластини в при чому 1 ряд встановлюється під кутами 1, 2, 3, з табл.1 другий ряд під кутами 2, 4 з табл.1, розташування пластин бічних кромки тангенційне на відміну від вершинної ділянки. Таким чином, представлена конструкція фрези на рис.11 дозволяє реалізувати таких підхід до розрахунків зуборізних фрез представлений в даній роботі.

Висновки. В даній роботі розроблено методику визначення параметрів однополосного гіперболоїду осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від евольвенти, що дає змогу його використовувати в якості ВПП дискових фрез для крупномодульних зубчастих коліс. Досліджено вплив модуля зубчастого колеса та числа зубів на мінімальні відхилення які можна досягти при такому способі заміни ВПП.

На основі проведених розрахунків представлена конструкція дискової зуборізної фрези з НПП прямолінійної форми, яка реалізує даний підхід.

Список літератури

- <https://www.gleason.com/eu/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools>. Opti-Cut Gear Milling Cutter.
- <https://www.lmt-tools.com/en/downloads>. Brochure Gear Cutting Experts
- <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/gear-manufacturing>. Gear manufacturing.
- О. Ключко, О. Охріменко, і М. Шаповалов, «Вихідна інструментальна поверхня модульних пальцевих фрез на базі однополосного гіперболоїда для виготовлення зубчастих евольвентних коліс», Mech. Adv. Technol., т. 5, вип. 3, с. 374–380, Груд 2021. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
- Radzevich, S.P. (2010). Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439819685>.
- Radzevich, S.P. (2022). Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003311744>.

7. Pasternak, S., Danylchenko, Y.M., Storchak, M., Okhrimenko, O.A. (2022). Gear Cutting with Disk-Shaped Milling Cutters. In: Radzevich, S.P., Storchak, M. (eds) *Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_5.
8. Zhang, W., Zhou, Q., Guo, X. et al. Digital generating method for cylindrical helical gear based on indexable disk milling cutter. *Int J Adv Manuf Technol* 119, 6835–6848 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08533-x>
9. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці навчальний посібник для студентів механічних спеціальностей вищих навчальних закладів / Н. С. Равська, П. П. Мельничук, О. В. Мамлюк [та ін.] . —К.: СКД «Друк», 2013. — 215 с.
10. Terniuk, M.E., Kryvosheia, A.V., Ustynenko, O.V., Krasnoshtan, O.M., Tkach, P.M. (2022). Multiparameter Gears and Gear-Type Variators. In: Radzevich, S.P., Storchak, M. (eds) *Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_12.
11. <https://www.scilab.org>.

References (transliterated):

1. <https://www.gleason.com/eu/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools>. Opti-Cut Gear Milling Cutter.
2. <https://www.lmt-tools.com/en/downloads>. Brochure Gear Cutting Experts.
3. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/gear-manufacturing>. Gear manufacturing.
4. O. Klochko, O. Okhrimenko, i M. Shapovalov, «Vykhidna instrumentalna poverkhnia modulnykh pal'tsevykh frez na bazi odnopolosnoho hiperboloida dlia vyhotovlennia zubchastykh evolventnykh koles», *Mech. Adv. Technol.*, t. 5, vyp. 3, s. 374–380, Hrud 2021. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
5. Radzevich, S.P. (2010). *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439819685>.
6. Radzevich, S.P. (2022). *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003311744>.
7. Pasternak, S., Danylchenko, Y.M., Storchak, M., Okhrimenko, O.A. (2022). Gear Cutting with Disk-Shaped Milling Cutters. In: Radzevich, S.P., Storchak, M. (eds) *Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_5.
8. Zhang, W., Zhou, Q., Guo, X. et al. Digital generating method for cylindrical helical gear based on indexable disk milling cutter. *Int J Adv Manuf Technol* 119, 6835–6848 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08533-x>
9. Osnovy formoutvorennia poverkhon' pry mekhanichnii obrobtsi: navchal'nyi posibnyk dlia studentiv mekhanichnykh spetsial'nostei vyshchykh navchal'nykh zakladiv / N.S. Ravs'ka, P.P. Mel'nychuk, O.V. Mamliuk [ta in.]. — K.: SKD «Druk», 2013. — 215 s.
10. Terniuk, M.E., Kryvosheia, A.V., Ustynenko, O.V., Krasnoshtan, O.M., Tkach, P.M. (2022). Multiparameter Gears and Gear-Type Variators. In: Radzevich, S.P., Storchak, M. (eds) *Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_12.
11. <https://www.scilab.org>.

Надійшла (received) 15.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Okhrimenko Oleksandr Anatoliiovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38067-936-36-64, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455.

Главчева Юлія Миколаївна (Hlavcheva Yuliia) – PhD, директор науково-технічної бібліотеки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: yuliia.hlavcheva@khpri.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>

Кореньков Володимир Миколайович (Korenkov Volodymyr) — PhD, доцент кафедри технології машинобудування Інституту машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: volodymyr.korenkov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1911-9496;

Красновид Дмитро Олександрович (Krasnovyd Dmytro) — PhD, доцент кафедри конструювання машин Інституту машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: krasnovid.d@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3189-4209;

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3781-6144

**Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, К. Р. МИГУЩЕНКО, О. М. ФІНОГЕНОВ,
К. Д. КОЦКАЛО**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У МЕХАНІЧНОМУ РОБОТІ

В статті розглянута практична наукова задача, яка полягає у оптимізації процесів подолання перешкод механічним роботом при русі по пересічній місцевості. Задача вирішувалась за рахунок ідентифікації, створення і аналізу математичної моделі технологічного процесу подолання перешкоди при висі на перекладині роботом за допомогою механічних важелів, з подальшим проведенням математичного та імітаційного моделювання. В статті сформовані схеми зміщення реального технологічного процесу на основі передачі електричних сигналів в електричному колі, розглянуті і проаналізовані електричні параметри математичних моделей у вигляді лінійних диференціальних рівнянь першого і другого порядку, визначені недоліки, які впливають на надмірне розгойдування механічного робота, встановлені кореляції між електричними параметрами схеми заміщення і реальними механічними параметрами робота при веденні ним визначеної механічної дії при подоланні перешкод, наведені пропозиції щодо оптимізації вказаних дій і сформульовані завдання для подальших досліджень.

Натурні досліди, які були проведені на реальному механічному роботі, при виконанні ним тестової вправи, виявили наявність затухаючих коливань амплітуди з часом. Отримані дані дозволили сформувати схему технічну модель такого технологічного процесу у вигляді послідовного електричного RLC -кола. Розгляд і аналіз диференціального рівняння, що описує поведінку параметрів в RLC -колі у вигляді диференціального рівняння другого порядку, підтвердив адекватність математичної моделі. Для усунення коливальних процесів при виконанні технологічного процесу механічним роботом, була розглянута схема технічна модель у вигляді RL -кола. Така схема технічна модель дозволила понизити порядок диференціального рівняння і сформувати математичну модель у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку. Розв'язок такого рівняння методом варіації змінних зі знаходження аналітичних виразів для загального і частинного рішень, дозволило здійснити імітаційне моделювання технологічної дії подолання перешкоди при висі на перекладині механічного робота за допомогою механічних важелів. Імітаційне моделювання показало, що перехідний процес, при використанні такої моделі, є аперіодичним експоненціальним процесом. Це вказує на шкідливість наявності реактивного елементу C у математичній моделі і його усунення спроможне вирішити поставлену практичну наукову задачу.

Виявлення відповідності між отриманою математичною моделлю електричної схеми заміщення і загальним рівнянням механіки для поступального руху, а також параметрами цих рівнянь, дозволило надати рекомендації щодо усунення параметру $C(\varphi)$ фізичний зміст якого полягає у варіації жорсткості підвісу і сильно залежить від довжини підвісу.

Ключові слова: механічний робот, схема технічна модель, математична модель, диференціальне рівняння, коливальний процес, аперіодичний процес

R. MYGUSHCHENKO, O. KROPACHEK, K. MYGUSHCHENKO, O. FINOHENOV, K. KOTSKALO **MODELING OF PROCESSES IN MECHANICAL ROBOTICS**

The article addresses a practical scientific problem involving the optimization of obstacle-overcoming processes by a mechanical robot moving over rough terrain. The problem is approached through the identification, construction, and analysis of a mathematical model of the technological process of obstacle overcoming during bar suspension by the robot using mechanical levers, followed by mathematical and simulation modeling.

The article presents substitution schemes of the real technological process based on the transmission of electrical signals within an electrical circuit. It also examines and analyzes the electrical parameters of mathematical models in the form of first- and second-order linear differential equations. Deficiencies affecting excessive oscillations of the mechanical robot are identified, and correlations are established between the electrical parameters of the substitution circuit and the real mechanical parameters of the robot during the execution of a defined mechanical action for overcoming obstacles. Proposals for optimizing these actions are provided, and directions for further research are formulated.

Experimental trials conducted on a physical mechanical robot during a test exercise revealed the presence of damped oscillations in amplitude over time. The collected data enabled the development of a circuit-technical model of this technological process in the form of a series RLC electrical circuit. The analysis of the differential equation describing the behavior of parameters in the RLC circuit, expressed as a second-order differential equation, confirmed the adequacy of the mathematical model.

To eliminate oscillatory processes during the robot's operation, a circuit-technical model in the form of an RL circuit was considered. This model reduced the order of the differential equation, resulting in a mathematical model represented by a first-order linear differential equation. The solution to this equation using the method of variation of parameters, along with the derivation of analytical expressions for both the general and particular solutions, enabled simulation modeling of the technological action of obstacle overcoming during bar suspension by the robot using mechanical levers.

The simulation modeling demonstrated that the transient process in this case is an aperiodic exponential process. This indicates the detrimental effect of the reactive element C in the mathematical model, and its removal can effectively resolve the stated practical scientific problem.

Establishing the correspondence between the resulting mathematical model of the electrical substitution circuit and the general equation of translational mechanical motion, as well as the parameters of these equations, made it possible to provide recommendations for eliminating the parameter $C(\varphi)$, whose physical meaning lies in the variation of suspension stiffness and which is strongly dependent on suspension length.

Key words: mechanical robot, circuit-technical model, mathematical model, differential equation, oscillatory process, aperiodic process

Вступ. Сучасні засоби роботизованої техніки все більш широко впроваджуються в життєдіяльність людини як на промисловому рівні, так і на рівні буденного життя. Роботи різного призначення та технологічного наповнення уже широко представлені в різних галузях виробництва і експлуатації промислового обладнання, де присутність людини є вкрай небезпечною. Це, в першу чергу, стосується військової сфери, сфер, де виникають шкідливі викиди під час роботи промислового обладнання, сфер, де доступ людини є неможливим з різного роду технологічних причин.

В якості базового, для досліджень, був обраний робот [1], зовнішній вигляд якого показано на рис. 1. Представлений робот оснащений рядом електромеханічних приводів [2], електронним блоком [1], низкою механічних вузлів (рис. 2). Його основним завданням є запуск літальних апаратів (дронів). Проте, на розглядуваний робот накладаються і інші функціональні вимоги. Серед таких є просування по пересічній місцевості, подолання перешкод, стабілізація горизонтального положення при запуску дронів тощо.

Відлагодження рухів роботів часто відбувається на відповідних змаганнях з робототехніки. Базовий робот дослідження, який виконаний учасниками гуртка з робототехніки школи Лінкольн Парк, приймав участь у таких змаганнях в штаті Іллінойс, США [2]. Авторами даних досліджень вже був виконаний аналіз недоліків функціонування досліджуваного робота, була підведена теоретична база щодо функціонування деяких приводів робота, були сформульовані рекомендації, які покращують працездатність робота. Проте, подальша робота з удосконалення функціонування окремих вузлів досліджуваного технічного об'єкту не є завершеною, автори продовжили свої дослідження.

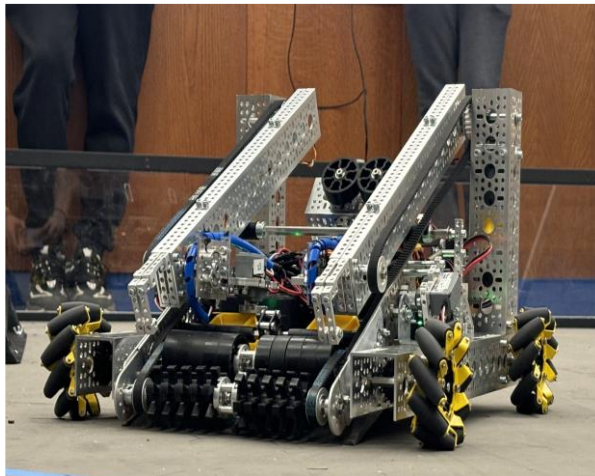
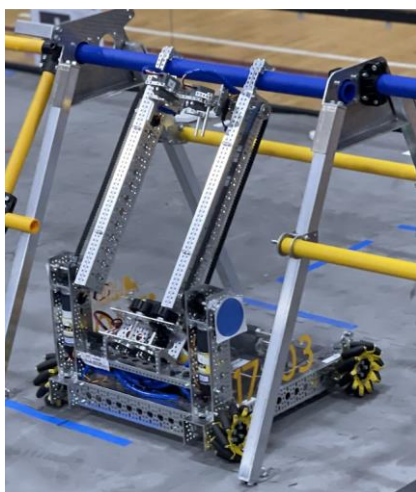


Рис. 1 – Досліджуваний робот

Під час подолання зовнішніх перешкод при просуванні робота по пересічній місцевості, представлений робот (рис. 1) використовує механічні важелі. Сам процес подолання вказаних перешкод продемонстровано на рис. 2, а, б.

а)



б)

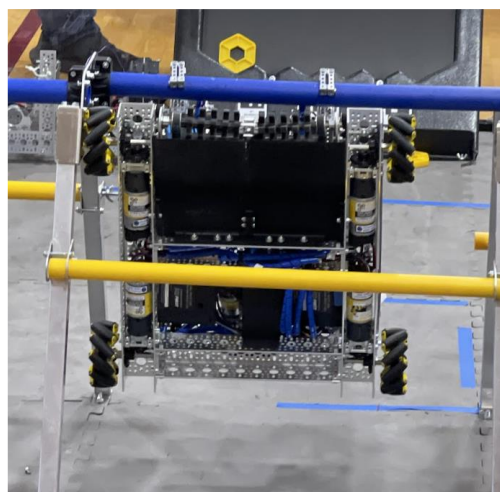


Рис. 2 – Подолання перешкод роботом

Коливальні процеси, якими супроводжуються процеси подолання перешкод, негативно впливають на рухи робота і чіткість виконання поставлених завдань. Зокрема це стосується запуску дронів. Самі коливальні рухи є рухами з сильним затуханням і можуть бути описані відповідними диференційними рівняннями. Наявність математичної моделі у вигляді диференційних чи інших рівнянь дозволяє здійснити додаткове вивчення процесів що пов'язані з функціонуванням роботів, в тому числі, завдяки математичному або імітаційному моделюванню.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою досліджень в статті є формування і дослідження математичної моделі об'єкта дослідження – механічного робота в режимі подолання перешкод при русі по пересічній місцевості.

Для досягнення мети необхідно:

- провести натурні експерименти з об'єктом дослідження;

- сформувати аналітичну схему заміщення;
- розробити і дослідити математичну модель процесу;
- надати рекомендації для оптимізації конструкції механічного робота;
- поставити задачі для подальших досліджень.

Аналіз математичної моделі другого порядку. При натурних дослідженнях були зняті характеристики коливальних рухів робота при висі, за допомогою механічних важелів, на перекладені. Дані і їх графічне зображення показані в табл. 1 та на рис. 3. Зважаючи на парусність, центр ваги, довжину підвісу – коливальний рух може бути описаним у вигляді [3]:

$$J_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b(t) \frac{d\varphi}{dt} + C(\varphi)\varphi = 0, \tag{1}$$

φ – кут коливання;
 $b(t)$ – коефіцієнт опору середовища;
 $C(\varphi)$ – коефіцієнт жорсткості.

Таблиця 1

| Час, сек | Відхилення, см |
|----------|----------------|
| 0 | 5.474 |
| 0.2 | -3.796 |
| 0.4 | 0.620 |
| 0.6 | 0.967 |
| 0.8 | -0.160 |
| 1.0 | 0,012 |

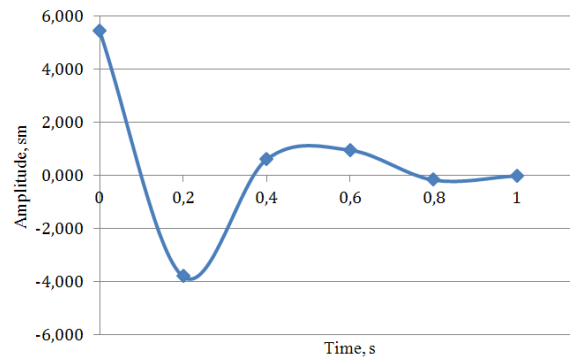


Рис. 3 – Механічні коливання

Для аналітичного розгляду описаного процесу доцільно сформувати відповідну схему заміщення [4]. Така схема, з електричними елементами, показана на рис. 4.

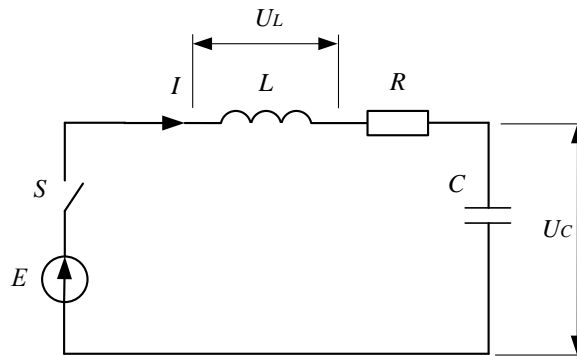


Рис. 4 – Схема заміщення коливального механічного процесу

Схема заміщення на рис. 4 відтворює коливальні затухаючі рухи робота і містить активні та реактивні елементи [5]. З [6] така схема заміщення може бути описаною диференційним рівнянням вигляду:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = E, \tag{2}$$

де L – значення індуктивності котушки;
 C – значення ємності конденсатора;
 i – миттєве значення електричного струму;
 R – значення опору резистора;
 E – напруга джерела живлення;
 t – час.

Рівняння (2), на відміну від (1), містить електричні параметри, але існує висока кореляція між електричними і механічними параметрами, які описують вказані коливальні процеси. В даних дослідженнях автори спирались на розгляд коливальних процесів через електричні параметри.

Зважаючи на [7]

$$i = C \frac{u_C}{dt}, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt,$$

де u_C – миттєве значення падіння напруги на конденсаторі C
 рівняння (2) можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} = 0. \quad (3)$$

Для зручності, а це співпадає з інженерною практикою, рівняння (3) можна записати у вигляді характеристичного рівняння, використовуючи перетворення Лапласа [8]. Тоді отримаємо:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (4)$$

Рішення рівняння (4) по електричному струму представляється у вигляді:

$$i = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \frac{E}{L(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

а, зважаючи на [7]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}, \quad \beta = \arctg \frac{\frac{R}{2L}}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}},$$

вираз для електричного струму встановлюється як:

$$i = \frac{E}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t),$$

що демонструє коливальні процеси всієї системи взагалі.

Аналіз математичної моделі першого порядку. Для виключення механічних коливань, які несуть негативні явища в роботу механічного робота, можливий розгляд диференційного рівняння, яким описується процес подолання перешкод при русі по пересічній місцевості, у вигляді диференційного рівняння першого порядку. Для цього авторами була використана схема заміщення, що представлена на рис. 5.

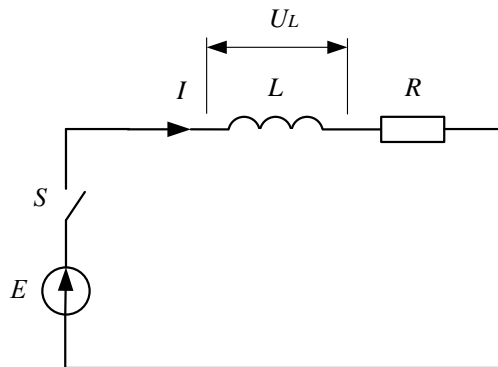


Рис. 5 – Схема заміщення процесів в механічному роботі

Диференційне рівняння, яке описує процеси в механічному роботі, для схеми заміщення на рис. 5 має вигляд:

$$L \frac{di}{dt} + iR = E. \quad (5)$$

Формула (5) описує процеси в схемі, зображеній на рис. 5, є базовою для опису RL-електричних кіл [6] і являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку.

Розглянемо відповідне однорідне рівняння до (5) [9]:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0.$$

Розділяємо змінні:

$$L \frac{di}{dt} = -iR, \quad \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} dt.$$

Інтегруємо та логарифмуємо:

$$\int \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \int dt,$$

$$\ln|i| = -\frac{R}{L} t + c.$$

За визначенням логарифма:

$$i = e^{-\frac{R}{L} t} \cdot e^c.$$

Приймаємо $e^c = c$. Тоді:

$$i = ce^{-\frac{R}{L} t}.$$

Отже, отримано розв'язок однорідного рівняння.

Методом варіації довільної сталої шукаємо розв'язок відповідного неоднорідного рівняння:

$$i(t) = c(t) \cdot e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Знайдемо $\frac{di}{dt}$:

$$\frac{di}{dt} = c' e^{-\frac{R}{L} t} - \frac{R}{L} c e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Підставимо i та $\frac{di}{dt}$ в початкове рівняння (5):

$$L \left(c' e^{-\frac{R}{L} t} - \frac{R}{L} c e^{-\frac{R}{L} t} \right) + c R e^{-\frac{R}{L} t} = E.$$

Розкриємо дужки:

$$L c' e^{-\frac{R}{L} t} - R c e^{-\frac{R}{L} t} + c R e^{-\frac{R}{L} t} = E,$$

$$L c' e^{-\frac{R}{L} t} = E.$$

Розділяємо змінні:

$$c' = \frac{dc}{dt},$$

$$L \frac{dc}{dt} e^{-\frac{R}{L} t} = E,$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{E}{L} e^{\frac{R}{L} t}.$$

Інтегруємо:

$$\int dc = \frac{E}{L} \int e^{\frac{R}{L} t} dt,$$

$$\int dc = \frac{E}{L} \cdot \frac{L}{R} \int e^{\frac{R}{L} t} dt.$$

Тоді

$$c(t) = \frac{E}{R} e^{\frac{R}{L} t} + A,$$

де A – константа.

Розв'язок шукаємо у вигляді:

$$i(t) = c(t)e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (6)$$

Підставляємо в (6) отримане $c(t)$:

$$i(t) = \left(\frac{E}{R} e^{\frac{R}{L}t} + A \right) e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Тоді

$$i(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}, \quad (7)$$

де $\frac{E}{R}$ – частковий розв’язок неоднорідного диференціального рівняння;

$Ae^{-\frac{R}{L}t}$ – загальний розв’язок неоднорідного диференціального рівняння.

Розв’язком рівняння (5) у загальному вигляді (7) є миттєве значення електричного струму i , який протікає в електричному колі RL (рис. 5) і має дві складові [10]:

$$i = i_1 + i_2,$$

де $i_1 = \frac{E}{R}$ – значення електричного струму, яке встановлюється після завершення перехідних процесів;

$i_2 = Ae^{-\frac{R}{L}t}$ – значення електричного струму під час перехідного процесу.

Щоб визначити сталу A вільної складової у (7), необхідно використати початкові умови.

Початкові умови визначаються з законів комутації [6]. У законах комутації вводяться поняття:

$i(0-)$ – миттєве значення електричного струму в електричному колі (рис. 5) безпосередньо перед замиканням ключа S у певний момент часу t ;

$i(0+)$ – миттєве значення електричного струму в електричному колі (рис. 5) одразу після замикання ключа S у певний момент часу t .

Відповідно до першого закону комутації [6]:

$$i(0-) = i(0+).$$

Оскільки до замикання ключа S (при $t = 0$) електричний струм в RL-електричному колі (рис. 5) відсутній, тобто дорівнював 0, то:

$$i(0-) = i(0+) = 0,$$

а це означає, що одразу після замикання ключа S електричний струм в RL-електричному колі:

$$i(t) = 0.$$

Тоді вираз (7) можна записати так:

$$i(t) = i(0+) = i(0-) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} \Big|_{t=0} = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L} \cdot 0} = \frac{E}{R} + Ae^0,$$

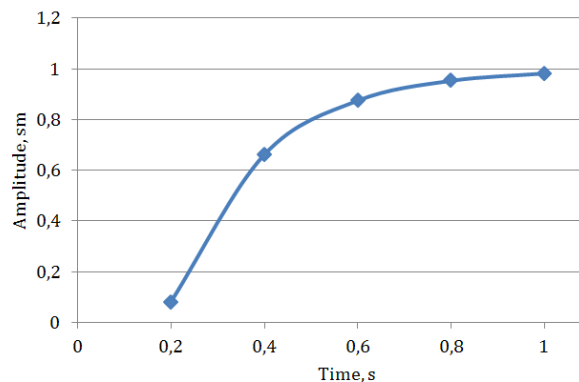
$$i(0+) = \frac{E}{R} + A,$$

$$A = i(0+) - \frac{E}{R} = -\frac{E}{R}.$$

Остаточний вираз (7) набуває такого вигляду:

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (8)$$

На основі (8) очевидно, що для схеми заміщення на рис. 5 процеси переходять із коливального характеру в аперіодичні [11]. Імітаційне моделювання (8) наведено на рис. 6.

Рис. 6 – Реализация переходного процесса в RL -контуре

Висновок і подальші дослідження. Проведені дослідження дозволяють оцінити вплив параметрів математичної моделі на характер процесів, які відбуваються у реальному технічному об'єкті.

При дослідженнях стало очевидним, що наявність електричної ємності в схемі заміщення реального технічного об'єкту призводить до підвищення порядку математичної моделі, а це, в свою чергу, призводить до виникнення коливальних процесів. Для переведення технічного об'єкту з коливального в аперіодичний режим необхідно позбутись ємності.

Зважаючи на високий рівень схожості математичних моделей (1) і (3) стає очевидним, що в реальному механічному роботі необхідно позбутись змінної $C(\varphi)$, фізичний зміст якої полягає в жорсткості підвісу і сильно залежить від довжини підвісу.

Таким чином, подальші натурні досліди із варіацією довжини механічних важелів та введення додаткових вузлів, які підвищують жорсткість механічних важелів, – це стратегія подальших досліджень з розглядуваним технічним об'єктом.

Список літератури:

1. Мигущенко Р. П. Дослідження властивостей механічного робота на прикладі фізичного маятника / Р.П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, В. М. Балєв, К. Р. Мигущенко, О. М. Фіногенов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2024. – № 1 (9). С. 3 – 12.
2. Mygushchenko R. Study of transient characteristics of electrical circuits in robotics / R. Mygushchenko, O. Kropachek, G. Suchkov, V. Baliev, K. Mygushchenko, K. Kotskalo // 5th IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week, Kharkiv. – 2024.
3. Цасюк В. В. Теоретична механіка : навчальний посібник. – Київ : ЦУЛ, 2004. – 402 с.
4. Dale E. Seborg. Process Dynamics and control, international student version, 3rd Edition / Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III. – Wiley, 2012. – 476 p.
5. Мигущенко Р. П. Дослідження параметрів коливального об'єкту / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, К. Д. Коцкало, О. М. Фіногенов // Матеріали Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків, 2024.
6. Мякшина И. Г. Текст лекций по ТОЕ : для студентов физико-технического факультета по специальности «Инженерная электрофизика» / И. Г. Мякшина, Е. Г. Глебова. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 348 с.
7. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : навчальний посібник. Т.2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик. – Київ : Техніка, 2006. – 465 с.
8. Байда Е. И. Решения задач электромеханики в прикладных пакетах программ : учеб.-метод. пособие / Е. И. Байда, О. Ю. Кропачек. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. – 180 с.
9. Филиппов А. Ф. Введение в теорию дифференциальных уравнений / А. Ф. Филиппов. – М., 2007. – 240 с.
10. Шегедин О. І. Теоретичні основи електротехніки / О. І. Шегедин, В. С. Маляр. – Львів : Магнолія плюс, 2004. – 168 с.
11. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки. Частина 1: навч. посібник / А. Ю. Воробкевич, В. С. Маляр, Р. Я. Совин, М. О. Соколовський, П. Г. Стахів, О. І. Шегедин ; за ред.: Воробкевича А. Ю., Шегедина О. І. – Київ : Магнолія плюс, 2004. – 224 с.

Bibliography (transliterated):

1. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia vlastyvostei mekhanichnoho robota na prykladi fizychnoho maiatnyka / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, V.M. Baliev, K.R. Myhushchenko, O.M. Finohenov // Visnyk NTU «KhPI». – 2024. – № 1 (9). S. 3 – 12.
2. Mygushchenko R. Study of transient characteristics of electrical circuits in robotics / R. Mygushchenko, O. Kropachek, G. Suchkov, V. Baliev, K. Mygushchenko, K. Kotskalo // 5th IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week, Kharkiv. – 2024.
3. Tsasiuk V.V. Teoretychna mekhanika: Navchalnyi posibnyk. – K.: TsUL, 2004. – 402 s.
4. Dale E. Seborg. Process Dynamics and control, international student version, 3rd Edition / Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III. – Wiley, 2012. – 476 p.
5. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia parametriv kolyvalnoho ob'iektu / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, K.D. Kotskalo, O.M. Finohenov // Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia». – Kharkiv, 2024.

6. Myakshina I.G. Tekst lektsiy po TOE dlya studentov fiziko-tehnicheskogo fakulteta po spetsialnosti «Inzhenernaya elektrofizika» / I.G. Myakshina, E.G. Glebova – Harkov: NTU «HPI», 2007. – 348 s.
7. Kucheruk I.M. Zahalnyi kurs fizyky: Navchalnyi posibnyk. T.2. Elektryka i mahnyetizm / I.M. Kucheruk, I.T. Horbachuk, P.P. Lutsyk.– Kyiv: Tekhnika, 2006. – 465 s.
8. Bayda E.I. Resheniya zadach Elektromehaniki v prkladnIh paketah programm: ucheb.-metod. posobie / E.I. Bayda, O.Yu. Kropachek – Harkov: NTU «HPI», 2017. – 180 s.
9. Filippov A.F. Vvedenie v teoriyu differentsialnyh uravneniy / A.F. Filippov – M., 2007. – 240 s.
10. Shehedyn O.I. Teoretychni osnovy elektrotekhnyky / O.I. Shehedyn, V.S. Maliar – Lviv: Mahnoliia plus, 2004. – 168 s.
11. Zbirnyk zadach z teoretychnykh osnov elektrotekhnyky. Chastyna 1: navch. posibnyk / A.Iu. Vorobkevych, V.S. Maliar, R.Ia. Sovyn, M.O. Sokolovskiy, P.H. Stakhiv, O.I. Shehedyn. Za redpksiieiu Vorobkevycha A.Iu., Shehedyna O.I. – Kyiv : Mahnoliia plus, 2004. – 224 s.

Надійшла (received) 10.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-099-40-22-885; e-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3287-9772.

Кропачек Ольга Юрївна (Kropachek Olga) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичних основ електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-067-79-5678-0; e-mail: kropachek@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5899-0252.

Мигущенко Катерина Русланівна (Mygushchenko Kateryna) – студентка Caltech, м. Пасадена; тел.: +38-099-484-32-88; e-mail: katyamig06@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5928-6975.

Фіногенов Олексій Михайлович (Finohenov Oleksii) – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-066-821-60-21; e-mail: alexey.finohenov@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6707-8511.

Коцкало Кирило Дмитрович (Kotskalo Kyrylo) – студент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-095-345-31-43; e-mail: kyrylo.kotskalo@cit.khpi.edu.ua .

В. Л. ХАВІН, Є. В. ХАВІН, Б. М. КИРКАЧ, О. Б. КИРКАЧ

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ У ШПИНДЕЛЬНИХ ВАЛАХ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКОСТІ ОПОР ЗА МОДИФІКОВАНОЮ МОДЕЛЮ ДЖОНСА-ХАРРИСА

В роботі запропоновано модель для визначення переміщень в багато опорних шпиндельних валах на нелінійно пружних опорах. Методом початкових параметрів в матричному вигляді отримано рішення задачі у вигляді системи рівнянь, в якій крім нелінійної залежності жорсткості підшипників від діючих на них зусиль, враховано ступінчасту геометрію шпиндельного валу. При розрахунку жорсткості опор застосовано багато параметричний підхід з фізично обґрунтованими характеристиками контакту елементів підшипників на базі модифікованої моделі Джонса-Харріса (МЖМ).

Запропонований метод і програмне забезпечення для вирішення нелінійної крайової задачі визначення переміщень в ступінчатих багато опорних шпиндельних валах з нелінійно пружними опорами реалізовано в середовищі MATLAB. Для розрахунку жорсткості нелінійно пружних опор застосовано модифіковану модель Джонса-Харріса.

Ключові слова: багато опорний ступінчастий шпиндельний вал, метод початкових параметрів, нелінійно пружні опори, модифікована модель Джонса-Харріса.

V. KHAVIN, E. KHAVIN, B. KYRKACH, O. KYRKACH

DETERMINATION OF DISPLACEMENTS IN SPINDLE SHAFTS DURING THE STIFFNESS CALCULATION OF SUPPORTS USING THE MODIFIED JONES-HARRIS MODEL

The paper proposes a model for determining movements in multi-support spindle shafts on nonlinear elastic supports. Using the method of initial parameters in matrix form, the solution of the problem was obtained in the form of a system of equations, in which, in addition to the nonlinear dependence of the stiffness of the bearings on the forces acting on them, the stepped geometry of the spindle shaft was taken into account. When calculating the stiffness of the supports, a multi-parametric approach with physically based contact characteristics of the bearing elements based on the modified Jones-Harris model (MJHM) is applied.

The proposed method and software for solving the nonlinear boundary value problem of determining displacements in stepped multi-support spindle shafts with nonlinear elastic supports is implemented in the MATLAB environment. A modified Jones-Harris model was used to calculate the stiffness of nonlinear elastic supports.

Key words: multi-support stage spindle shaft, method of initial parameters, nonlinear elastic supports, modified Jones-Harris model.

Актуальність

Точність обробки деталей на металообробних верстатах залежить від величини пружних переміщень деталі і інструменту в зоні обробки. Характеристики жорсткості шпиндельного вузла безпосередньо визначають точність та стабільність процесу металообробки. Внаслідок цього, визначення переміщень для багато опорних шпиндельних валів відіграє важливу роль у забезпеченні точності роботи верстата.

Суттєвим фактором, який впливає на точність визначення переміщень, є нелінійна жорсткість підшипників шпиндельного валу. Для розрахунку переміщень в сучасних шпиндельних валах необхідно використовувати модель багато опорної балки на нелінійно пружних опорах, де розподіл реактивних опорних зусиль залежить від жорсткості опор, яка в свою чергу, нелінійно залежить від величини діючих реактивних зусиль. Підвищення якості розрахунку переміщень в шпиндельних валах залежить від рівня точності моделювання їх деформування шляхом впровадження багато параметричних підшипникових моделей з фізично обґрунтованими нелінійними характеристиками. Запропонована модель розрахунку дозволяє уточнити оцінку жорсткості опор до 50%.

Достовірний розрахунок жорсткості опор кочення у сукупності з універсальними підходами до вирішення задачі визначення переміщень для багато опорних шпиндельних валів дозволяє при проектуванні оптимізувати конструкцію шпиндельного вузла, визначивши оптимальну кількість опор, їх тип і положення.

Тому, разом з вдосконаленням відповідних експериментальних методів, актуальною є задача розробки ефективних теоретичних моделей і методів розрахунку переміщень багато опорних шпиндельних валів метало ріжучих верстатів для визначення їх пружних деформацій і жорсткості.

Постановка і метод рішення задачі. Аналіз літературних джерел. При проектуванні шпиндельного вузла важливу роль відіграє оцінка його жорсткості під дією зусиль різання і навантаження з боку привода.

В якості перших моделей для визначення переміщень приймалися пружні балки постійного поперечного перерізу на двох лінійно пружних опорах, які навантажувалися сконцентрованими силами [1,2]. У подальшому, приведення багато опорних ступінчатих валів до двоопорної моделі за рахунок введення спеціальних коефіцієнтів себе не виправдало [3].

Уточнення розрахунків з врахуванням конструктивних особливостей багато опорних ступінчатих шпиндельних валів проводилось чисельними методами, такими як МСЕ [4-13]. У більшості робот цього напрямку застосовувалися програмні комплекси, здебільшого ANSYS. Такі комплекси потребують значних фінансових затрат на їх придбання, опанування та експлуатацію.

В роботі [14] запропоновано підхід до розрахунку згинальних переміщень багато опорних шпиндельних валів на основі метода початкових параметрів (МПП). У порівнянні з МСЕ, МПП має систему рівнянь меншого розміру і потребує меншого об'єму вхідних даних для вирішення задачі. В роботах [15-17] на основі МПП було розроблено універсальний підхід до статичного аналізу багато опорних шпиндельних валів з довільною кількістю опор і з врахуванням їх нелінійної жорсткості.

При статичному аналізі шпindelних валів зазвичай використовуються довідникові середні значення жорсткості опор - підшипників кочення. Але жорсткість підшипників кочення істотно залежить від діючих на них сил, величини технологічних зазорів і попереднього затягування, теплових навантажень, посадок зовнішнього і внутрішнього кілець, що може дати похибку в оцінці жорсткості опори до 50 %. Сучасні нелінійні моделі підшипників засновані на врахуванні силової рівноваги контактуючих елементів підшипників, що деформуються в радіальному і осьовому напрямках. Відповідні процедури для кулькових і роликів підшипників є типовими, основна відмінність полягає в моделях розрахунку контактних переміщень.

В моделях розрахунку контактних переміщень шарикопідшипників використовується класичне рішення з точковим контактом по Герцу [18] і еліптичним контактом [19]. Найбільш відомими моделями для розрахунку жорсткості підшипників є моделі з одним і двома ступенями вільності [20-25]. Загальні чисельно-аналітичні рівняння для визначення контактних переміщень і характеристик жорсткості у моделях підшипників з одним і двома ступенями вільності були отримані в роботах [20-22] і розвинуті Де Мюлем з співавторами [26, 27] та ін. В останні десятиліття дослідниками використовувався числовий метод скінченних елементів (МСЕ), який при визначенні розподілу зусиль і переміщень більш точно враховує контактну взаємодію між елементами підшипника.

На основі моделі Герца Джонсом і Харрісом [20,22] було отримано аналітичні залежності для розрахунку нелінійних жорсткостей опор кочення, так звану модель Джонса-Харріса (JHM). У роботі [28] для радіальних шарикопідшипників був запропонований метод, названий модифікованим методом Джонса-Харріса (MJHM), який за рахунок застосування МСЕ дозволяє отримати більш точну чисельно-аналітичну модель. У роботах [29,30] для шарикових і роликів підшипників обґрунтована ефективність застосування модифікованої моделі Джонса-Харріса, що дозволяє отримати більш точну і відносно просту чисельно-аналітичну модель розрахунку нелінійної радіальної жорсткості підшипників.

Мета даної роботи – розробка підходу, математичної моделі і програмного забезпечення для визначення переміщень в багато опорних ступінчастих шпindelних валів з нелінійно пружними опорами, для розрахунку жорсткості яких застосовується модифікована модель Джонса-Харріса.

Постановка задачі. При побудові розрахункової схеми і математичної моделі шпindelного валу в даній роботі були використані гіпотези і положення, які наведені в роботі [17].

Розрахункова схема багато опорного шпindelного валу (рис. 1,а). має M ділянок з шматковою постійною згинальною EI_m та зсувною жорсткістю GA_m , $m = 1,2,3, \dots, M$.

Кожен з N підшипників є пружною опорою з нелінійною жорсткістю C_n і реакцією R_n , $n = 1,2, \dots, N$. У площині yoz вал навантажується зусиллям та моментом різання F_{yc}, M_{xc} , а також зусиллям та моментом F_{yd}, M_{xd} з боку приводу.

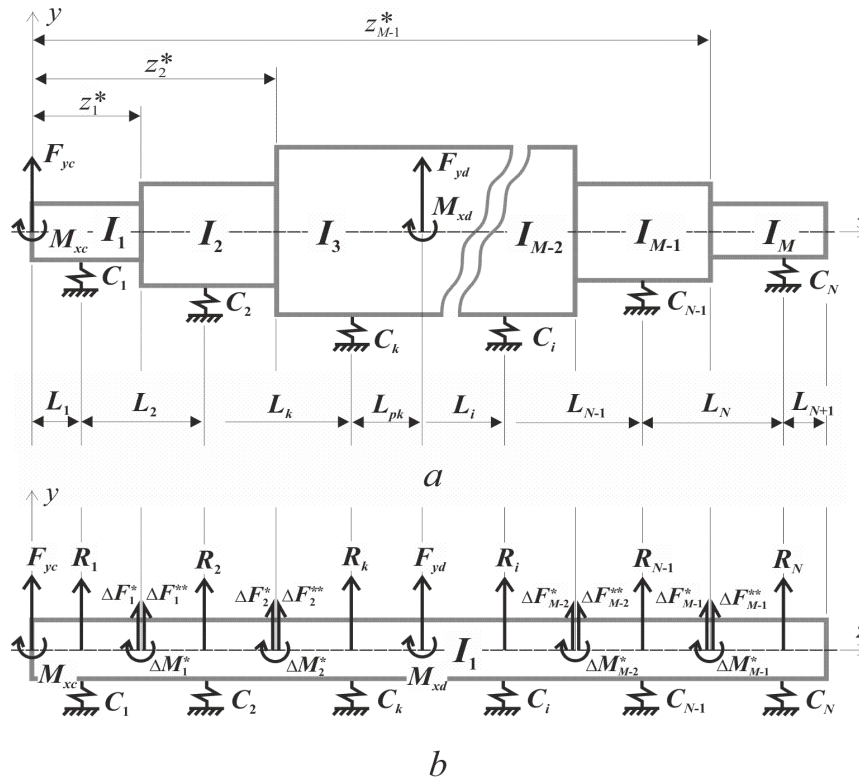


Рис. 1 – Розрахункова схема багато опорного ступінчастого шпindelного валу

1. **Метод рішення крайової задачі.** Для моделювання згину шпindelного валу використовується модель балки Тимошенко, оскільки згинальна жорсткість ділянок валу співмірна з жорсткістю цих ділянок на зсув. У відповідності з цією моделлю рівняння зігнутою осі m -тої ділянки виглядає [19]:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI_m} - \frac{K_{tm}}{GA_m} \frac{dQ_y(z)}{dz}, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

де z – поточна координата, $y(z)$ – функція прогину балки, E – модуль пружності, G – модуль зсуву, I_m, A_m – осьовий момент інерції та площа перерізу даної ділянки валу відповідно, $M_x(z), Q_y(z)$ – згинальний момент та поперечна сила відповідно в перерізі з координатою z , K_{tm} – коефіцієнт форми перерізу даної ділянки валу.

У даній роботі для розрахунку прогину використовується модифікований метод початкових параметрів [17]. Його основна відмінність від класичного МПП полягає в тому, що ступінчастий вал приводиться до еквівалентної по деформаціях балки постійного перерізу, розміри якого дорівнюють, наприклад, розмірам поперечного перерізу першої ділянки. Для забезпечення тотожності деформації початкового і еквівалентного валів внутрішні силові фактори останнього модифікуються за допомогою спеціальних коефіцієнтів приведення. Внаслідок цього рівняння (1) дещо змінюється і зберігає схожість з рівнянням зігнутої осі балки постійного поперечного перерізу, а саме

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{k_m^* M_x(z)}{EI_1} - \frac{K_{t1} k_m^{**}}{GA_1} \frac{dQ_y(z)}{dz}, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

де I_1, A_1, K_{t1} – відповідно момент інерції, площа перерізу і коефіцієнт форми перерізу першої ділянки валу, $k_m^* = I_1/I_m$ – згинальний коефіцієнт приведення для m -ої ділянки валу, $k_m^{**} = K_{tm} A_1 / K_{t1} A$ – зсувний коефіцієнт приведення на тій же ділянці.

В граничних точках ділянок початкового валу, до еквівалентного валу треба прикласти додаткові згинальні моменти ΔM_m^* і поперечні зусилля ΔF_m^* (рис. 1b). Величини цих навантажень нескладно визначити за формулами

$$\Delta F_m^* = (k_{m+1}^* - k_m^*) Q_y(z_m^*), \quad \Delta M_m^* = (k_{m+1}^* - k_m^*) M_x(z_m^*), \quad (3)$$

де z_m^* – координата границі m -ої і $(m+1)$ -ої ділянок вала (див. рис. 1a), $m = 1, 2, \dots, M - 1$.

В додаток до цього, оскільки використовується модель балки Тимошенко, на границях ділянок еквівалентного валу слід прикласти додаткові поперечні сили, зв'язані з другим додатком (зсувом) у правій частині рівняння (2) (рис. 1b).

$$\Delta F_m^{**} = (k_{m+1}^{**} - k_m^{**}) Q_y(z_m^*), \quad m = 1, 2, \dots, M - 1. \quad (4)$$

Після того, як усі навантаження на еквівалентний вал визначені, рішення диференціального рівняння (2) у відповідності до [17] має вигляд

$$y(z_i) = y_0 + \theta_0 z_i + \Phi(z_i), \quad \theta(z_i) = \theta_0 + \Phi^*(z_i), \quad (5)$$

де y_0 та θ_0 – відповідно прогин та кут повороту вала на початку координат, $\Phi(z_i), \Phi^*(z_i)$ – універсальні функції, які залежать від зовнішніх навантажень, z_i – локальна координата, яка завдається наступним чином,

$$\sum_{j=1}^{i-1} L_j \leq z_i \leq \sum_{j=1}^i L_j, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Функції $\Phi(z_i)$ та $\Phi^*(z_i)$ з рішення (5) можна представити у виді

$$\begin{aligned} \Phi(z_i) &= \frac{\Phi_1(z_i)}{EI_1} - K_{t1} \frac{\Phi_2(z_i)}{GA_1}, \\ \Phi^*(z_i) &= \frac{\Phi_1^*(z_i)}{EI_1} - K_{t1} \frac{\Phi_2^*(z_i)}{GA_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

При цьому $\Phi_1(z_i), \Phi_2(z_i), \Phi_1^*(z_i), \Phi_2^*(z_i)$ виражаються через зовнішні навантаження і наведено в роботі [17].

У залежностях (2)-(4) k_{mk}^* і k_{mk}^{**} – відповідно згинальний та зсувний коефіцієнти приведення для ділянки валу, на якій прикладаються зусилля від приводу, k_{ml}^* і k_{ml}^{**} – відповідно згинальний та зсувний коефіцієнти приведення для ділянки валу, на якій діє реактивне зусилля R_l .

На опорі з номером n прогин валу y_n пов'язаний з реакцією опори R_n та її жорсткістю C_n наступним співвідношенням:

$$R_n = -C_n y_n, \quad (8)$$

з якого, і з врахуванням формул (5) та (7), слідує умова поєднання на опорах

$$y_n = y_0 + \theta_0 z_n + \frac{\Phi_1(z_n)}{EI_1} - \frac{K_{r1}}{GA_1} \Phi_2(z_n) = -\frac{R_n}{C_n}, \quad (9)$$

$$z_n = \sum_{j=1}^n L_j, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

До рішення диференційного рівняння зігнутої осі валу (5) і умовам поєднання (9) слід додати умови статичної рівноваги – рівність нулю проекцій сил на вісь y і суми моментів сил відносно лівого кінця валу.

$$\sum_{n=1}^N R_n + F_{yc} + F_{yd} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N \left(R_n \sum_{j=1}^n L_j \right) + F_{yd} \left(\sum_{j=1}^k L_j + L_{1k} \right) - M_{xc} - M_{xd} = 0 \quad (11)$$

Співвідношення (9) – (11) є системою з $(N+2)$ рівнянь для $(N+2)$ невідомих – реакцій опор $R_n, n = 1, 2, \dots, N$, а також прогину y_0 і кута повороту θ_0 перерізу вала на початку координат. Для визначення $\Phi_1(z_n)$ та $\Phi_2(z_n)$ в (9) використовуються залежності для $\Phi_1(z_i)$ і $\Phi_2(z_i)$ відповідно при заміні множини z_i на множину координат $z_n, n = 1, 2, \dots, N$. Рішення системи рівнянь (9)-(11) дає можливість визначити прогин та кут повороту довільного перерізу валу з врахуванням податливості його опор. Перехід від моделі балки Тимошенко до моделі балки Бернуллі здійснюється за допомогою занулення коефіцієнта форми перерізу K_{r1} та зсувних коефіцієнтів приведення $k_m^{**}, m = 1, 2, \dots, M$.

У разі, якщо жорсткості опор є постійними, тобто $C_n = const, n = 1, 2, \dots, N$, крайова задача (9)-(11) лінійна і вирішується порівняно просто, за один крок. У даній роботі враховується змінна жорсткість підшипників в залежності від реактивних зусиль, тобто $C_n = C_n(R_n), n = 1, 2, \dots, N$. В такому разі система рівнянь (9)-(11) є нелінійною і повинна вирішуватись в ітераційному процесі з відповідним контролем збіжності.

2. Визначення жорсткості опор. Аналіз літератури з розрахунку пружних характеристик підшипників кочення [22,24,32-34] показує, що, навіть без урахування впливу технологічних зазорів і посадки на вал, жорсткість підшипників суттєво нелінійна. Залежність абсолютної деформації підшипника по напрямку діючої сили внаслідок контактної взаємодії конструктивних елементів носить нелінійний характер, а технологічні зазори і посадка підшипника на вал ускладнюють характер нелінійності.

Для розрахунку жорсткості опор застосовуються статичні моделі, в яких для визначення радіальної деформації підшипника, як правило, розглядається деформація навантаженого елемента кочення. Контакт розглядається в рамках теорії Герца для напівнескінчених криволінійних контактних поверхонь з пружним тілом кочення. Це дозволяє отримати наведені нелінійні відносини, що зв'язують зближення контактуючих поверхонь з зусиллям, що діє на підшипник. Відносини формуються або у дискретному вигляді за рахунок врахування кінцевого числа навантажених тіл кочення або в безперервній, інтегральній формі, при розподілі жорсткості (зусиль) по довж навантаженої зони шляхом введення інтегрального коефіцієнта розподілу навантаження. У всіх моделях розподілу зусиль можна враховувати зазор у підшипнику і додаткові фактори (швидкість обертання, посадку кілець та ін.).

Для статичних інженерних моделей розрахунку жорсткості підшипників в рамках теорії контакту Герца були використані гіпотези і положення, які наведено в роботі [29].

В усіх інженерних чисельно-аналітичних квазістатичних моделях підшипників узагальнююча залежність між силою і переміщенням в контактній зоні тіла кочення з обіймами (кільцями) підшипника представляється у вигляді:

$$Q = K \delta^m \quad (12)$$

де Q – нормальне зусилля, що діє на тіло кочення, K – характеристика жорсткості, δ – нормальне переміщення, m – показник нелінійності.

Контактне зусилля Q_n (обумовлене рівновагою) однакове для внутрішнього (Q_i) і зовнішнього (Q_e) кілець:

$$Q_i = Q_e = Q_n \quad (13)$$

Повне радіальне контактне переміщення внутрішнього кільця по відношенню до зовнішнього кільця в нормальному напрямку відносно доріжок кочення визначається співвідношенням:

$$\delta_n = \delta_i + \delta_e \quad (14)$$

де δ_i і δ_e – абсолютні контактні деформації в контакті тіла кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцями відповідно.

Згідно (12) - (14) для окремого тіла кочення, що контактує з внутрішнім і зовнішнім кільцями, має місце співвідношення:

$$Q_n = K_n \delta_n^m, \quad (15)$$

де результуюча характеристика жорсткості визначається залежністю:

$$K_n = \left[\frac{1}{(1/K_i)^{1/m} + (1/K_e)^{1/m}} \right]^m \quad (16)$$

У цьому виразі K_i і K_e – характеристики жорсткості контакту тіла кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцем підшипника відповідно. Характеристики жорсткості залежать від матеріалу тіла кочення і кілець, діаметра тіла кочення D , конфігурації доріжок кочення, наявності тертя і мастила та ін. Характеристики жорсткості визначаються шляхом рішення відповідної контактної задачі. Спосіб формування характеристик жорсткості в залежності (16) і розрізняє чисельно-аналітичні моделі і визначає рівень їх коректності.

На основі експериментальних досліджень, шляхом введення додаткових гіпотез при рішенні контактних задач і використання однієї з моделей розподілу зусиль по елементах кочення, був запропонований ряд інженерних формул для розрахунку характеристик жорсткості радіальних та радіально-упорних шарикопідшипників [20-22,35-37].

Узагальнення отриманих в роботах [20-22,35-37] відношень дозволяє сформулювати універсальну структуру залежностей, які для радіальних та радіально-упорних підшипників зв'язують радіальне переміщення внутрішньої обойми по відношенню до зовнішньої обойми з поточним зовнішнім зусиллям:

$$\begin{aligned} F_r &= K_{\delta r} \delta_r^m, \\ \delta_r &= K_{F_r} F_r^{\frac{1}{m}} \end{aligned} \quad (17)$$

де F_r – зовнішнє радіальне зусилля, що діє на підшипник, δ_r – радіальне переміщення внутрішнього кільця по відношенню до зовнішнього в напрямку зовнішнього зусилля, m – показник не лінійності, $K_{F_r}, K_{\delta r}$ – характеристики радіальної жорсткості підшипника, для яких мають місце узагальнені залежності [20 – 22, 35 – 37].

$$\begin{aligned} K_{F_r} &= P_r d^{n_1} Z^{n_2} (\cos \alpha)^{n_3} \\ K_{\delta r} &= K_{F_r}^{-n} \\ K_{F_r} &= P_r d^{n_1} Z^{n_2} (\cos \alpha)^{n_3}, \\ K_{\delta r} &= K_{F_r}^{-n} = P_r^{-m} d^{-mn_1} Z^{-mn_2} (\cos \alpha)^{-mn_3} \end{aligned} \quad (18)$$

де P_r – чисельний коефіцієнт, d – діаметр тіла кочення, Z – кількість елементів кочення. α - кут контакту в радіально-упорних підшипниках ($\alpha = 0$ для радіальних підшипників).

В рамках додаткових гіпотез, які спрощують використання напівемпіричних методів вирішення задач пружного контакту тіл кочення з контактними поверхнями, в роботах [20-23,35-37] отримано параметри характеристик радіальної жорсткості для залежностей (24),(25), що зв'язують зближення контактуючих поверхонь з зусиллям, діючим на підшипник. Чисельні значення параметрів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри характеристик радіальної жорсткості підшипників без урахування зазору для відомих класичних залежностей

| Автор | Параметри характеристик жорсткості | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|
| | n | n_1 | n_2 | n_3 | $P_r, \frac{MM}{H^{1/n}}$ |
| Гарджуліо, [37] | 1,5 | -1/3 | -2/3 | -5/3 | $1,275 \cdot 10^{-3}$ |
| Хуперт, [36] | 1,5 | -1/3 | -2/3 | -5/3 | $1,81 \cdot 10^{-3}$ |
| Палмгрен-Джонс- Харріс, [20-23] | 1,5 | -1/3 | -2/3 | -5/3 | $1,27 \cdot 10^{-3}$ |

де $\varepsilon = \left(\frac{1+\bar{k}}{\bar{k}}\right)^{0,23} \frac{n}{MM^n}$, \bar{k} - коефіцієнт осциляції.

Через нелінійну залежність деформації δ_r від зовнішнього зусилля, значення жорсткості підшипників кочення для певного значення зусилля можна отримати як «січну» або «дотичну» жорсткість.

Із загального співвідношення для «січної» жорсткості

$$C_r = F_r / \delta_r, \tag{19}$$

вираз для «січної» жорсткості можна отримати з врахуванням діючого радіального зусилля (17):

$$C_r = K_{Fr}^{-1} F_r^{\frac{m-1}{m}}. \tag{20}$$

Для радіально-упорних шарикопідшипників значення початкового кута контакту α дещо змінюється в залежності від величини сили, що діє на підшипник, і визначається спеціальним розрахунком [24]. «Дотична» жорсткість визначається похідною і має вигляд:

$$C_r^* = dF_r / d\delta_r = m K_{Fr}^{-1} F_r^{\frac{m-1}{m}}. \tag{21}$$

Вирази (20), (21) є узагальненими нелінійними залежностями для «січної» і «дотичної» жорсткості шарикопідшипників кочення. Значення констант для характеристики радіальної жорсткості в (20), (21) наведено в таблиці 1.

Аналіз даних з таблиці 1 показує значну схожість результатів у розглянутих моделях. Найвідомішою і популярною є модель, яка називається моделлю (методом) Джонса-Харріса, чи JHM-моделлю. Для статичного розподілу зусиль між тілами кочення в JHM-моделі використані залежності, отримані Стрибеком [38] за допомогою інтеграла Сьяволла [39] без урахування і з урахуванням технологічного зазору в підшипнику [20-23].

У роботі [28] запропоновано, а в [29,30] застосовано модифікований метод Джонса-Харріса (MJHM), де, на відміну від JHM - моделі, для розрахунку характеристик жорсткості контакту тіла кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцем підшипника K_i і K_e використовується не чисельно-аналітична модель контакту по Герцу, а скінчено-елементні періодичні моделі [28], що складаються з двох півкуль (половина тіла кочення), що контактують кожна окремо з 1/Z-й частиною внутрішнього та зовнішнього кільця підшипника відповідно.

Скінчено-елементні моделі, що використовуються для визначення характеристик жорсткості в контакті елемент кочення – підшипникові кільця, більш точно відображають фактичну геометрію і жорсткість зовнішньої і внутрішньої доріжок кочення підшипника.

Експерименти підтвердили, що результати MJHM при визначенні жорсткості точніші, ніж результати, отримані методом JHM [28] і практично узгоджуються з результатами, отриманими при моделюванні деформацій підшипника «в цілому» методом скінчених елементів.

Робочий і комп'ютерний час, необхідний при використанні МЖМ, помітно менше, ніж при використанні для розрахунку жорсткості МСЕ для підшипника в цілому. Також застосування моделі МЖМ дає можливість при незначних обчислювальних трудовитратах отримати сімейство кривих для підшипника, що характеризують залежність його радіальної жорсткості від зовнішнього зусилля і швидкості обертання, що забезпечить інженерний розрахунок жорсткостей з досить високою точністю.

У моделі МЖМ, як і в моделі ЖМ, зв'язок між радіальною деформацією підшипника δ_r , що визначається на найбільш навантаженій кульці, та зовнішньою радіальною силою F_r по аналогії з (17) задається виразом:

$$\delta_r = K_{Fr}^{\circ} F_r^{1/m}, \quad (22)$$

де K_{Fr}° – характеристика жорсткості, що залежить від пружних властивостей матеріалів контактуючих тіл і геометрії контакту (діаметра кульок, діаметрів і кривизни доріжок кочення). У моделі МЖМ коефіцієнт K_{Fr}° в (22) відповідає коефіцієнту K_{Fr} в (17) в ЖМ – моделі і визначається методом скінченних елементів розрахунком для кожного типорозміру підшипника, а жорсткості розраховуються за залежностями (20), (21) з заміною K_{Fr} на K_{Fr}° .

Результати розрахунку жорсткості підшипника фірми SKF марки 6201, що наведено в [28], показують невідповідність з експериментальними даними до 40 – 50% для моделі ЖМ і 3 – 12% для моделі МЖМ, а показник нелінійності для МЖМ дорівнює $m=1,3$ на відміну від $m=1,5$ в ЖМ – моделі. Також аналіз чисельних результатів, представлених в [28], показує, що використання моделі МЖМ дає підвищення точності розрахунку жорсткості на 20 - 40% для серії радіальних підшипників фірми SKF в порівнянні з ЖМ – моделлю.

В даній роботі змінна жорсткість $C_n = C_n(R_n)$ опор-підшипників розраховується в залежності від значень реактивних зусиль з використанням МЖМ-моделі. Нелінійна система рівнянь (9)-(11) вирішувалась в ітераційному процесі з відповідним контролем збіжності.

Рішення системи рівнянь. Для чисельного рішення система рівнянь (9)-(11) записується у матричному вигляді

$$AX = B, \quad (23)$$

де $A = [a_{ij}]_{(N+2) \times (N+2)}$ – матриця коефіцієнтів при невідомих, $B = \{b_i\}_{N+2}$ – вектор правих частин, $X = \{y_0, \theta_0, R_1, R_2, \dots, R_N\}^T$ – вектор невідомих, який включає початкові параметри і реакції опор. Коефіцієнти матриці A і компоненти вектора B отримано в роботі [17].

Для рішення нелінійної системи рівнянь (23) використовувався ітераційний процес, запропонований у [15,16]:

Крок 1. Задається початковий набір жорсткостей опор $C_{n0}, n = 1, 2, \dots, N$, і підраховуються елементи матриці системи рівнянь та вектора правих частин.

Крок 2. Вирішується система лінійних алгебраїчних рівнянь (23) і визначається початковий набір реактивних зусиль $R_{n1}, n = 1, 2, \dots, N$.

Крок 3. По відповідним залежностям $C_{n1} = C_n(R_{n1}), n = 1, 2, \dots, N$, вираховується новий набір жорсткостей опор та перераховуються коефіцієнти матриці системи рівнянь і вектора правих частин.

Крок 4. Знову вирішується система лінійних алгебраїчних рівнянь (23) і визначається новий набір реактивних зусиль, $R_{n1}, n = 1, 2, \dots, N$. Після чого здійснюється повернення до кроку 3.

Кроки 3 та 4 виконуються циклічно доти, поки не буде досягнута задана точність, яка оцінюється по приросту жорсткостей і (або) реактивних зусиль.

Запропонований ітераційний процес застосовано в [16] у вигляді метода послідовних ітерацій (МПІ) сумісно з моделлю «січної» жорсткості і метода послідовних навантажень (МПН) сумісно з моделлю «дотичної» жорсткості.

При значній кількості опор при врахуванні нелінійної жорсткості підшипників реалізація цього алгоритму є трудомісткою задачею. Тому необхідним етапом даної роботи була реалізація запропонованої моделі і алгоритму у вигляді програми у середовищі MATLAB.

Результати розрахунків переміщень для багатого опорного валу. Розроблений підхід було застосовано до розрахунку пружних переміщень шпиндельного валу фрезерувального верстату з роботи [17], геометрія та розрахункова схема якого подані на рис.2.

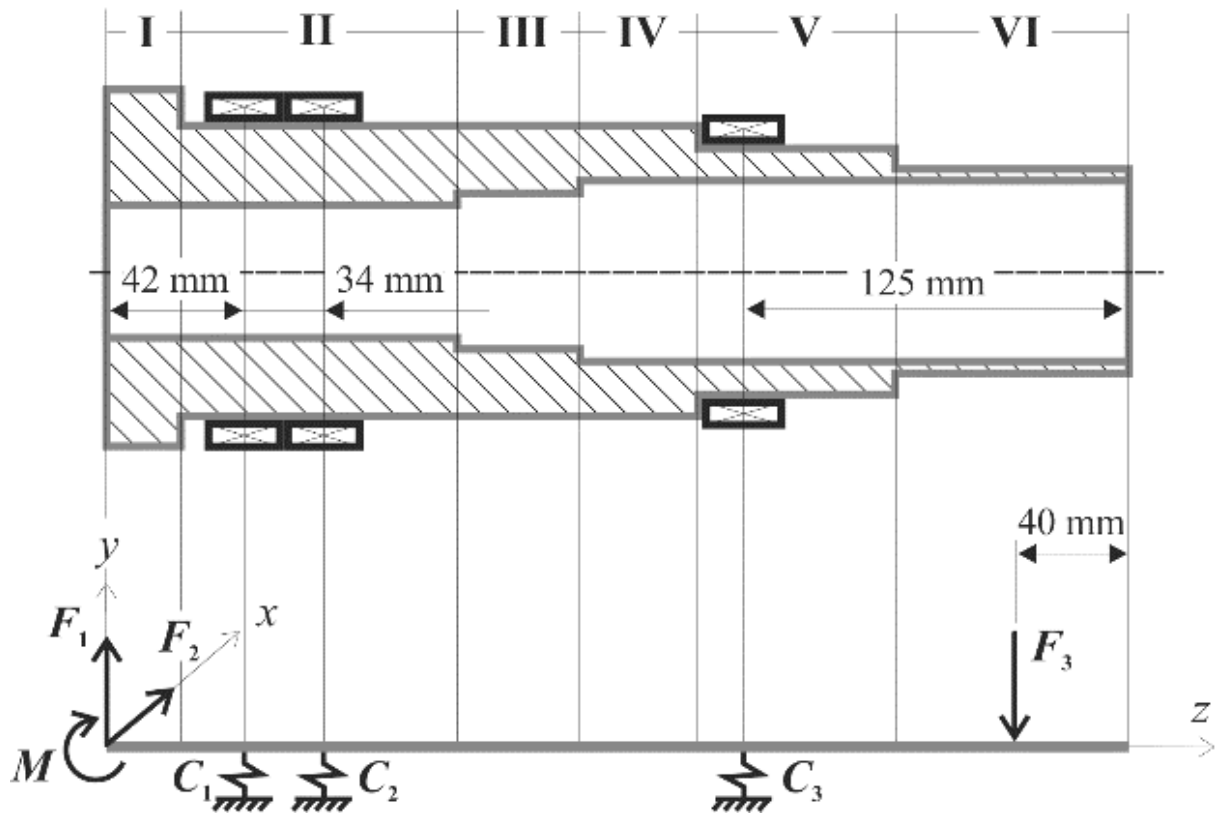


Рис. 2 – Шпиндельний вал фрезерувального верстату

Вал має 6 ділянок різної жорсткості, які пронумеровані римськими цифрами. Геометричні параметри та жорсткості ділянок приведені в таблиці 2, коефіцієнт форми перерізу для усіх ділянок валу приймається однаковим - $K_f = 2$ (кільце).

Зовнішнє навантаження складається з сил різання $F_1 = 10^3 N, F_2 = 600 N$, моменту різання $M = 50 Nm$, а також зусилля від приводу $F_3 = 300 N$.

Навантаження F_1, F_3 та M , як показано на рис. 2, згинають вал у площині yz , а сила F_2 - у площині xz .

Таблиця 2 – Параметри ділянок валу

| № | $D_{зовн}$ mm | $d_{внутр}$, mm | Довжина L , mm | EI_i , $Nm^2 \cdot 10^{-5}$ | GA_i , $N \cdot 10^{-8}$ |
|-----|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| I | 130 | 60 | 15 | 29,4 | 8,32 |
| II | 100 | 60 | 79 | 8,97 | 4,02 |
| III | 100 | 65 | 105 | 8,59 | 3,63 |
| IV | 100 | 75 | 83 | 7,06 | 2,75 |
| V | 90 | 75 | 57 | 3,51 | 1,55 |
| VI | 80 | 75 | 85 | 0,953 | 0,487 |

Передня опора валу є парою радіальних шарикопідшипників марки *SKF 6220*, розташованих впритул один до одного. У якості задньої опори використовується одинарний шарикопідшипник марки *SKF 6220*. Технічні

дані підшипника і характеристики жорсткості наведено в таблиці 3, також в таблиці наведено номінальну жорсткість шарикопідшипника *SKF 6220*, C_{n0} , яку отримано з довідникової літератури [40].

Таблиця 3– Характеристики підшипника

| Марка | $D_{зовн}$ mm | $d_{вн.}$ mm | Ширина B , mm | Число шариків Z | Діаметр шаріка d_0 , mm | Показник нелінійності [29] | Характеристики жорсткості [29] (н/мкм) |
|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|---|---|
| <i>SKF-6220</i> | 180 | 100 | 34 | 14 | 24 | МЈНМ-модель $m = 1,3$ ЈНМ-модель $m = 1,5$ | МЈНМ-модель $K_{Fr}^{\circ} = 0,3 * 10^{-4}$ J НМ-модель $K_{Fr} = 0,758 * 10^{-4}$ По стійна жорсткість опор $C_{n0} = 1,4 * 10^5$ |

В таблиці 4 приведені результати статичного розрахунку переміщень перерізів валу u_x та u_y , у напрямку осей x і y відповідно, в залежності від осьовій координати z при застосуванні для розрахунку жорсткостей опор розглянутих моделей.

Дані таблиці 4 наведено на рис.3,4 у вигляді графіків, де представлено результати розрахунку переміщень при застосуванні для моделювання жорсткості опор моделей з таблиці 3.

Таблиця 4 – Поперечні переміщення перерізів валу

| z, mm | 0 | 12,5 | 25 | 42 | 59 | 179 | 299 | 361 | 424 |
|---|------|------|------|------|------|--------|--------|-------|-------|
| МЈНМ-модель u_y, mkt | 6,82 | 6,17 | 5,47 | 4,65 | 3,84 | -0,688 | -4,680 | -7,77 | -11,8 |
| МЈНМ-модель u_x, mkt | 3,5 | 3,26 | 2,99 | 2,66 | 2,35 | 0,567 | -1,0 | -1,86 | -2,72 |
| ЈНМ-модель u_y, mkt | 8,61 | 7,83 | 7,0 | 6,0 | 5,02 | -0,787 | -6,06 | -9,82 | -14,5 |
| ЈНМ-модель u_x, mkt | 4,82 | 4,5 | 4,15 | 3,72 | 3,3 | 0,757 | -1,58 | -2,83 | -4,08 |
| Номінальна довідкова жорсткість [40] u_y, mkt | 7,43 | 6,74 | 5,99 | 5,17 | 4,22 | -0,745 | -5,17 | -8,48 | -12,7 |
| Номінальна довідкова жорсткість [40] u_x, mkt | 3,19 | 2,98 | 2,73 | 2,44 | 2,16 | 0,636 | -0,66 | -1,39 | -2,1 |

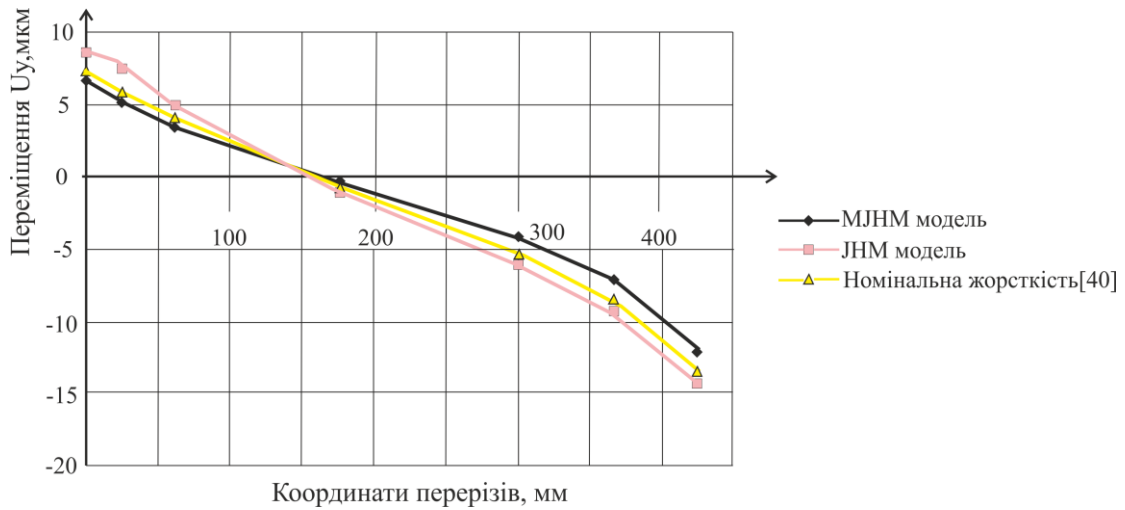


Рис. 3 – Переміщення U_y

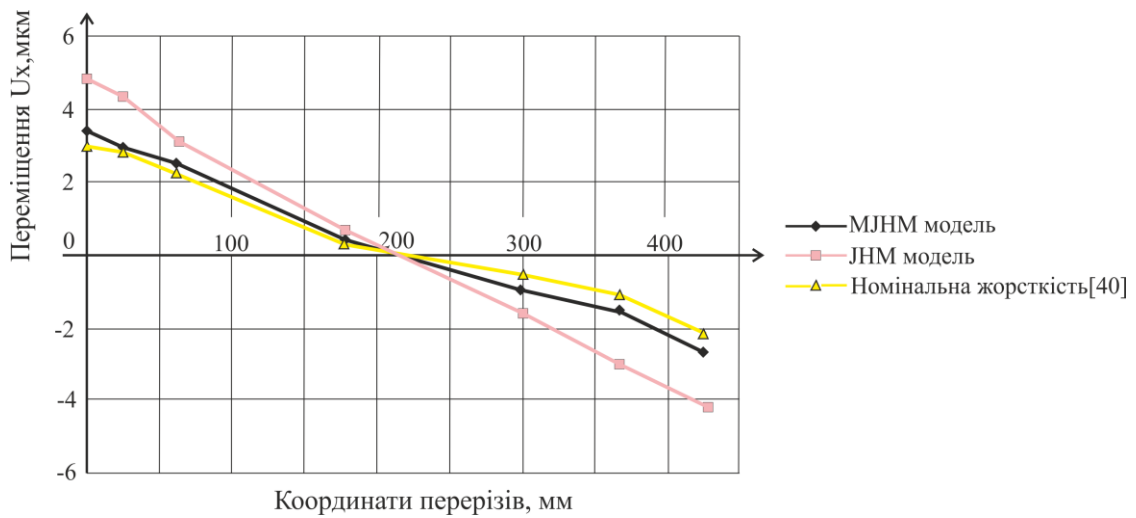


Рис. 4– Переміщення U_x

Аналіз результатів показує, що порівняно з класичною моделлю Джонса-Харріса, застосування її модифікованої моделі дозволяє уточнити переміщення робочого кінцевого перерізу шпиндельного валу фрезерного верстата на 25%. Слід зазначити, що в даному випадку застосування середньої довідникової жорсткості для даного рівня діючих зусиль і типу підшипників дозволяє отримати для статичних переміщень даного валу достатньо коректне рішення, яке відрізняється від рішення з опорами модифікованої нелінійної жорсткості на 7-15%.

Висновки.

В роботі запропонований універсальний підхід і математична модель для визначення переміщень в багато опорних ступінчастих шпиндельних валах на нелінійно пружних опорах, для розрахунку жорсткості яких застосовується модифікована модель Джонса-Харріса.

Засобами пакету MATLAB розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє за короткий проміжок часу провести аналіз переміщень при просторовому згинанні ступінчастих шпиндельних валів, нелінійна жорсткість яких розраховується по модифікованій моделі Джонса-Харріса.

Проведено розрахунки пружних переміщень 3-х опорного шпиндельного валу фрезерувального верстату. Результати розрахунків показали, що порівняно з результатами, які отримано при застосуванні класичної моделі Джонса-Харріса, застосування її модифікованої моделі дозволяє уточнити переміщення робочого кінцевого перерізу шпиндельного валу фрезерного верстата на 25%.

Список літератури

1. Решетов Д. Н. Расчет валов (шпинделей) с учетом упругого взаимодействия их с опорами. – М.: Машгиз, 1939. – 75 с.
2. L. Lewinthal, "Machine Tool Spindle Applications", SKF Industries Inc. Engineering and Research, SKF Norden, Feb 1983.
3. K.J.H. Shareef, J.A. Brandon, "On the quasi-static design of machine tool spindies", Journal of Engineering Manufacture, vol. 204, 1990, pp. 91-104.
4. Y. Cao, Y. Altintas, "A general method for the modelling of spindle-bearing systems", J. Mech. Des. Transactions of the ASME, vol. 126, 2007.
5. D. Liu, H. Zhang, Z. Tao, Y. Su, "Finite element analysis of high-speed motorized spindle based on ANSYS", The Open Mechanical Engineering Journal, vol. 5, 2011, pp. 1-10.
6. H. Sun, G. Yin, L. Mi, Y. Yin, "Study on the design and analysis of spindle system of NC machine tools based on digital design", Key Engineering Materials, vol. 522, 2012, pp. 668-672.
7. H. Cao, B. Li, Z. He, "Finite element model updating of machine-tool spindle systems", Journal of Vibration and Acoustics, vol. 135, 2013.
8. S. Shivakumar, A.N. Kallol, V. Khadakhbavi, "Analysis of lathe spindle using ANSYS", Int. J. Sci. & Eng. Res., vol. 4(9), 2013, pp. 431-440.
9. A. Telang, "Static stiffness analysis of high frequency milling spindle", Int. J. Res. Eng. Tech. (IJRET), vol. 3(3), 2014, pp. 577-585.
10. Hareesha, "Static and dynamic analysis of a CNC milling spindle", Int. Res. J. Eng. Tech. (IRJET), vol. 2(7), 2015, pp. 222-228.
11. N.L. Carutasu, "Virtual simulation for static behavior of the main spindle assembly of a horizontal drilling and milling CNC machining with a high-speed cutting", Annals of the ORADEA University, vol. XXV(XV), 2016.
12. A. Anand, H. Roy, "Static and dynamic analysis of lathe spindle using ANSYS", Int. J. Appl. Eng. Res., vol. 13(9), 2018, pp. 6994-7000
13. J. Premkumar, V.M. Kumar, K. Theenathayalan, "Design and analysis of boring bar using ANSYS", Int. J. Tech. Res. Eng. (IJTRE), vol. 5(11), 2018, pp. 4584-4587.
14. Чернявский П.М. Жесткость металлорежущих станков: Учебное пособие. М.: изд. МВТУ, 1969, 20с.
15. O. Kyrkach, V. Khavin, I. Khavina, "A computational technique for the static analysis of multi-support spindle shafts with nonlinear elastic bearings", Proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology Conference, Kharkiv, Ukraine, 5-10 Oct. 2020, pp. 402-406.
16. В.Л. Хавін, О.Б. Киркач, Б.Н. Киркач "Статичний аналіз багатоопорних шпиндельних валів на нелінійно пружних опорах". Вісник НТУ «ХПІ» №2, 2021р., с.94-100. Сер. "Динаміка та міцність машин".
17. В.Л. Хавін, О.Б. Киркач, Б.Н. Киркач "Статичний аналіз багатоопорних ступінчатих шпиндельних валів на нелінійно пружних опорах". Вісник НТУ «ХПІ» № 2, 2022р. с. 48-55. Сер. "Динаміка та міцність машин". DOI: 10.20998/2078-9130.2022.2.270866
18. Hertz H. On the contact of elastic solids. *J. Reine Angew. Math.*, 1881, vol. 92, pp. 156-171.
19. Timoshenko G. Theory of elasticity. McGraw-Hill, 1970. 608 p.
20. Jones, A. B. (1960), "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings," *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering*, **82**, pp 309-320.
21. Palmgren A. Ball and Roller Bearing Engineering. SKF Industries Inc., Philadelphia, 1959.
22. Harris, T. A. (1966), *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley.
23. Gargiulo, E.P., Jr., A Simple Way to Estimate Bearing Stiffness, Machine Design, 1980, pp.107-110
24. Kovalev M.P., Narodetskiy M.Z. Raschet vysokotochnykh шарикоподшипников [Calculation of high-precision ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 280 p.
25. Perel' L.Ya., Filatov A.A. Podshipniki kacheniya: raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor [Ball bearings: calculation, engineering and supports maintainance]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 608.
26. De Mul J., Vree J., Maas D. Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction. Part I: General theory and application to ball bearings // Journal of Tribology. 1989. Vol. 111. No. 1. P. 142-148.
27. De Mul J.M., Vre J.M.e, Maas D.A. Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction. Part II: Application to roller bearings and experimental verification // Journal of Tribology. 1989. Vol. 111. No. 1. P. 149-155.
28. Yuan Kanga, Ping-Chen Shen, Chih-Ching Huangc, Shyh-Shyong Shyrc, Yeon-Pun Chang "A Modification of the Jones- Harris Method for Deep-Groove Ball Bearings," *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, 2006, pp. 1413-1420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.12.005>.
29. В.Л.Хавін, Б.М.Киркач, С.Ю.Погорілов, С.Ю.Шергін, Ефективна модель розрахунку нелінійної жорсткості шарикопідшипників. Вісник НТУ «ХПІ», 2023.–№1(7).– сс.82-93
30. Хавін В.Л., Киркач Б.М., Шергін С.Ю. Вдосконалена інженерна модель розрахунку радіальної жорсткості роликових підшипників // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine University "KhPI": зб. наук.пр. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. –140-149. ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).07.
31. M.D. White, "Timoshenko beam theory with modelling applications", University of Waterloo, 1994.
32. T. Hentati, F. Dammak, T. Fakhfakh, M. Haddar, "A finite element development for ball bearing nonlinear stiffness modelization", Int. J. Simul. Model., vol. 4(3), 2005, pp. 118-128.
33. Y. Zhang, G. Sun, T.C. Lim, L. Xie, "A fast and reliable numerical method for analyzing loaded rolling element bearing displacement and stiffness", JVE Journal of Vibroengineering, vol. 17(2), 2015, pp. 620-642.
34. V.-C. Tong, S.-W. Hong, "Study of stiffness of cylindrical roller bearings under combined radial and moment loads", Int. J. Mech. Prod. Eng., vol. 5(1), 2017, pp. 28-31.
35. Rijnberg, J. L. (2007). Theoretical modeling of the stiffness of angular contact ball bearings using a two DOF and a five DOF approach. (DCT rapporten; Vol. 2007.129). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
36. Houpert, L. 1997. A Uniform Analytical Approach for Ball and Roller Bearing Calculations. Journal of Tribology, Vol. 119, pp. 851-858.
- 37 Gargiulo, E.P., Jr., A Simple Way to Estimate Bearing Stiffness, Machine Design, 1980, pp.107-110.
38. R. Stribeck, "Ball Bearings for Various Loads," *Transactions of the ASME*, Vol. 29, 1907, pp. 420-463.
39. H. Sjøvall, "The Load Distribution within Ball and Roller Bearings under Given External Radial and Axial Load," *TekniskTidskrift, Mek.*, h.9, 1933.
40. L.A. Kolesnikov, "Issledovanie staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik shpindel'nyh uzlov stankov pri avtomatizirovannom proektirovanii", Minsk, BNTU, 2017, 55s.

References (transliterated)

1. D.N. Reshetov, "Raschet valov (shpindelej) s uchetom uprugogo vzaimodejstvija ih s oporami", Mashgiz, 1939 75c.
2. L. Lewinthal, "Machine Tool Spindle Applications", SKF Industries Inc. Engineering and Research, SKF Norden, Feb 1983.
3. K.J.H. Shareef, J.A. Brandon, "On the quasi-static design of machine tool spindies", Journal of Engineering Manufacture, vol. 204, 1990, pp. 91-104.
4. Y. Cao, Y. Altintas, "A general method for the modelling of spindle-bearing systems", J. Mech. Des. Transactions of the ASME, vol. 126, 2007.

5. D. Liu, H. Zhang, Z. Tao, Y. Su, "Finite element analysis of high-speed motorized spindle based on ANSYS", *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol. 5, 2011, pp. 1-10.
6. H. Sun, G. Yin, L. Mi, Y. Yin, "Study on the design and analysis of spindle system of NC machine tools based on digital design", *Key Engineering Materials*, vol. 522, 2012, pp. 668-672.
7. H. Cao, B. Li, Z. He, "Finite element model updating of machine-tool spindle systems", *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 135, 2013.
8. S. Shivakumar, A.N. Kallol, V. Khadakhbavi, "Analysis of lathe spindle using ANSYS", *Int. J. Sci. & Eng. Res.*, vol. 4(9), 2013, pp. 431-440.
9. A. Telang, "Static stiffness analysis of high frequency milling spindle", *Int. J. Res. Eng. Tech. (IJRET)*, vol. 3(3), 2014, pp. 577-585.
10. Hareesha, "Static and dynamic analysis of a CNC milling spindle", *Int. Res. J. Eng. Tech. (IRJET)*, vol. 2(7), 2015, pp. 222-228.
11. N.L. Carutasu, "Virtual simulation for static behavior of the main spindle assembly of a horizontal drilling and milling CNC machining with a high-speed cutting", *Annals of the ORADEA University*, vol. XXV(XV), 2016.
12. A. Anand, H. Roy, "Static and dynamic analysis of lathe spindle using ANSYS", *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13(9), 2018, pp. 6994-7000
13. J. Premkumar, V.M. Kumar, K. Theenathayalan, "Design and analysis of boring bar using ANSYS", *Int. J. Tech. Res. Eng. (IJTRE)*, vol. 5(11), 2018, pp. 4584-4587.
14. Chernyavsky' j P.M. Zhestkost' metallozhashy' x stankov: Uchebnoe posoby'e. M.: y'zd. MVTU, 1969, 20s.
15. O. Kyrkach, V. Khavin, I. Khavina, "A computational technique for the static analysis of multi-support spindle shafts with nonlinear elastic bearings", *Proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology Conference*, Kharkiv, Ukraine, 5-10 Oct. 2020, pp. 402-406.
16. V.L. Khavin, O.B. Kyrkach, B.N. Kyrkach. Statychnyi analiz bahatopornykh shpyndelnykh valiv na neliiniino pruzhnykh oporakh [Static analysis of multi-support spindle shafts on nonlinear elastic supports]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of the NTU "KhPI"*, no. 2, 2021, pp. 94–100. Ser. "Dynamika ta mitsnist mashyn" – Series: "Dynamics and Strength of Machines".
17. V.L. Khavin, O.B. Kyrkach, B.N. Kyrkach. Statychnyi analiz bahatopornykh stupinchastykh shpyndelnykh valiv na neliiniino pruzhnykh oporakh [Static analysis of multi-support stepped spindle shafts on nonlinear elastic supports]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of the NTU "KhPI"*, no. 2, 2022, pp. 48–55. Ser. "Dynamika ta mitsnist mashyn" – Series: "Dynamics and Strength of Machines". DOI: 10.20998/2078-9130.2022.2.270866
18. Hertz H. On the contact of elastic solids. *J. Reine Angew. Math.*, 1881, vol. 92, pp. 156–171.
19. Timoshenko G. *Theory of elasticity*. McGraw-Hill, 1970. 608 p.
20. Jones, A. B. (1960), "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings," *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering*, **82**, pp 309-320.
21. Palmgren A. *Ball and Roller Bearing Engineering*. SKF Industries Inc., Philadelphia, 1959.
22. Harris, T. A. (1966), *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley.
23. Gargiulo, E.P., Jr., A Simple Way to Estimate Bearing Stiffness, *Machine Design*, 1980, pp.107-110
24. Kovalev M.P., Narodetskiy M.Z. Raschet vysokotochnykh sharikopodshipnikov [Calculation of high-precision ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 280 p.
25. Perel' L.Ya., Filatov A.A. Podshipniki kacheniya: raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor [Ball bearings: calculation, engineering and supports maintenance]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 608.
26. De Mul J., Vree J., Maas D. Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction. Part I: General theory and application to ball bearings // *Journal of Tribology*. 1989. Vol. 111. No. 1. P. 142–148.
27. De Mul J.M., Vre J.M.e, Maas D.A. Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction. Part II: Application to roller bearings and experimental verification // *Journal of Tribology*. 1989. Vol. 111. No. 1. P. 149–155.
28. Yuan Kanga_ Ping-Chen Shen, Chih-Ching Huangc, Shyh-Shyong Shyrc, Yeon-Pun Chang "A Modification of the Jones- Harris Method for Deep-Groove Ball Bearings," *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, 2006, pp. 1413-1420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.12.005>.
29. V.L. Khavin, B.M. Kyrkach, S.Yu. Pohorilov, S.Yu. Sherhin. Efektyvna model rozrakhunku neliiniinoi zhorkosti sharykopydshypnykyv [Effective model for calculating the nonlinear stiffness of ball bearings]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of the NTU "KhPI"*, no. 1(7), 2023, pp. 82–93.
30. V.L. Khavin, B.M. Kyrkach, S.Yu. Sherhin. Vdoskonalena inzhenerna model rozrakhunku radialnoi zhorkosti rolykovykh pidshypnykyv [Improved engineering model for calculating the radial stiffness of roller bearings]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*, no. 2(8), 2023, pp. 140–149. ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).07.
31. M.D. White, "Timoshenko beam theory with modelling applications", University of Waterloo, 1994.
32. T. Hentati, F. Dammak, T. Fakhfakh, M. Haddar, "A finite element development for ball bearing nonlinear stiffness modelization", *Int. J. Simul. Model.*, vol. 4(3), 2005, pp. 118-128.
33. Y. Zhang, G. Sun, T.C. Lim, L. Xie, "A fast and reliable numerical method for analyzing loaded rolling element bearing displacement and stiffness", *JVE Journal of Vibroengineering*, vol. 17(2), 2015, pp. 620-642.
34. V.-C. Tong, S.-W. Hong, "Study of stiffness of cylindrical roller bearings under combined radial and moment loads", *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5(1), 2017, pp. 28-31.
35. Rijnberg, J. L. (2007). Theoretical modeling of the stiffness of angular contact ball bearings using a two DOF and a five DOF approach. (DCT rapporten; Vol. 2007.129). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
36. Houpert, L. 1997. A Uniform Analytical Approach for Ball and Roller Bearing Calculations. *Journal of Tribology*, Vol. 119, pp. 851–858.
37. Gargiulo, E.P., Jr., A Simple Way to Estimate Bearing Stiffness, *Machine Design*, 1980, pp.107-110.
38. R. Stribeck, "Ball Bearings for Various Loads," *Transactions of the ASME*, Vol. 29, 1907, pp. 420-463.
39. H. Sjoval, "The Load Distribution within Ball and Roller Bearings under Given External Radial and Axial Load," *TekniskTidskrift, Mek.*, h.9, 1933.
40. L.A. Kolesnikov, "Issledovanie staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik shpindel'nykh uzlov stankov pri avtomatizirovannom proektirovanii", Minsk, BNTU, 2017, 55s.

Надійшла (received) 03.01.25

Відомості про авторів / About the Authors

Хавін Валерій Львович (Khavin Valeriy) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: Valerij.Havin@khp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4827-6474.

Хавін Євгеній Валерєвич (Khavin Evgen) – кандидат технічних наук, директор ТОВ «Світс-7»; e-mail: ehavin@ukr.net, ORCID: 0009-0007-3593-8102.

Киркач Борис Миколайович (Kyrkach Borys) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп’ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: Borys.Kyrkach@khp.edu.ua, ORCID: [0000-0002-0432-1296](https://orcid.org/0000-0002-0432-1296).

Киркач Олексій Борисович (Kyrkach Oleksiy) – інженер-механік-конструктор, ТОВ «Енейбл Україна»; e-mail: olky@enabl.dk., ORCID: [0000-0003-4594-557X](https://orcid.org/0000-0003-4594-557X).

Я. В. ВАСИЛЬЧЕНКО, О. Є. МИРОНЕНКО

ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПРИВІДНИХ ШЕСТЕРЕН БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Пропоновано застосування асиметричних зубчастих коліс для надійного обертання гвинтів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) необхідно забезпечення кінематичну точність привідних шестерень, норми плавності, норми бокового зазору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень. Розроблені асиметричні зубчасті передачі для модернізації безпілотних літальних апаратів дозволяють підсилити вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів, Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів. Заміна спочатку використаних симетричних зубчастих коліс для зубчастих передач з асиметричними зубами дозволила використовувати потужніші та економічні двигуни без модернізації корпусу привода. Розроблені інтегровані підпрограми для порівняння симетричних та асиметричних навантажень на вигин зубів. Представлені приклади фінішної сітки та ізотропії напруги

Ключові слова: асиметричні зубчасті коліса, безпілотні літальні апарати, поліамідні матеріали.

Y. VASYLCHENKO, O. MYRONENKO

ENHANCING THE STRENGTH OF DRIVE GEARS IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

The use of asymmetric gear wheels has been proposed to ensure reliable rotation of propellers in unmanned aerial vehicles (UAVs). This requires maintaining the kinematic accuracy of drive gears, compliance with smoothness standards, and proper backlash tolerances, with one of the primary requirements being the strength of the gear teeth.

The developed asymmetric gear transmissions for UAV modernization make it possible to increase payload capacity and integrate more powerful engines. Improved tooth strength in the drive gears enables the use of polyamide materials for their manufacture. Replacing the originally used symmetric gears with asymmetric-tooth gear systems has made it possible to utilize more powerful and fuel-efficient engines without modifying the drive housing.

Integrated subprograms have been developed to compare bending loads on symmetric and asymmetric teeth. Examples of final mesh models and stress isotropy are presented.

Keywords: asymmetric gears, unmanned aerial vehicles, polyamide materials.

Вступ. Конструкції безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, включають в себе кілька ключових елементів: корпус (фюзеляж), джерело енергії, рухову установку, та систему навігації. Додатково, в залежності від призначення, дрони можуть мати різне обладнання, таке як камери, датчики, та системи зв'язку. Рухова установка: включає в себе двигуни, гвинти, привідні шестерні та інші елементи, які забезпечують рух дрона. Для надійного обертання гвинтів апарату необхідно забезпечення кінематичну точність привідних шестерень, норм плавності, норми бокового зазору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень.

Мета дослідження. Визначити вплив окремих конструктивно-технологічних факторів на показники якості привідних шестерень безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, які виготовлюються з асиметричним профілем зуба за допомоги математичного аналізу у вигляді нелінійної багатофакторної математичної залежності.

Викладання основного матеріалу та результати. Дослідження та розробка асиметричних зубчастих передач для модернізації безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, дозволяє підсилити його вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів, у т.ч. і турбуваних, та дає можливість підвищити надійності роботи апаратів. Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів.

Застосування асиметричних зубчастих передач для приводів безпілотних літальних апаратів дозволяє значно збільшити щільність передачі потужності, потенційно збільшуючи їх вантажопідйомність та зменшуючи розміри та вагу. Однак практичних реалізацій таких передач не так багато. Одне з таких застосувань асиметричних передач в приводів безпілотних літальних апаратів.

Щоб підвищити вантажопідйомність у межах існуючих розмірів, ваги та терміну служби, зберігаючи достатні фактори безпеки та надійності було пропоновано впровадження циліндричних зубчастих передач з асиметричними профілями зуба[1,3,4,5].

Дрон може пересуватися повітрям, у вод і на землі. Дрон програмується на виконання завдань за задалегідь заданими алгоритмами. Дронами можна назвати безпілотні автомобілі, роботехнічні комплекси (роботи-сапери, роботи-розвідники). До дронів відносяться всі безпілотники - квадрокоптери (мультикоптери), літаки (БПЛА), наземні платформи (танки, машини, роботи), човни, безекіпажні морські катери із запрограмованими діями чи зі штучним інтелектом. Сучасні дрони розрізняються за способом польоту та його дальністю, вагою корисного навантаження та іншими характеристиками. Поєднання практичних властивостей в одному апараті робить його використання ефективним у різних видах діяльності, починаючи від бойових дій та закінчуючи будівництвом.

Види дронів приведена на рис. 1

Сучасні дрони розрізняються за способом польоту та його дальністю, вагою корисного навантаження та іншими характеристиками. Поєднання практичних властивостей в одному апараті робить його використання ефективним у різних видах діяльності, починаючи від бойових дій та закінчуючи будівництвом.

Види дронів приведена на рис. 1

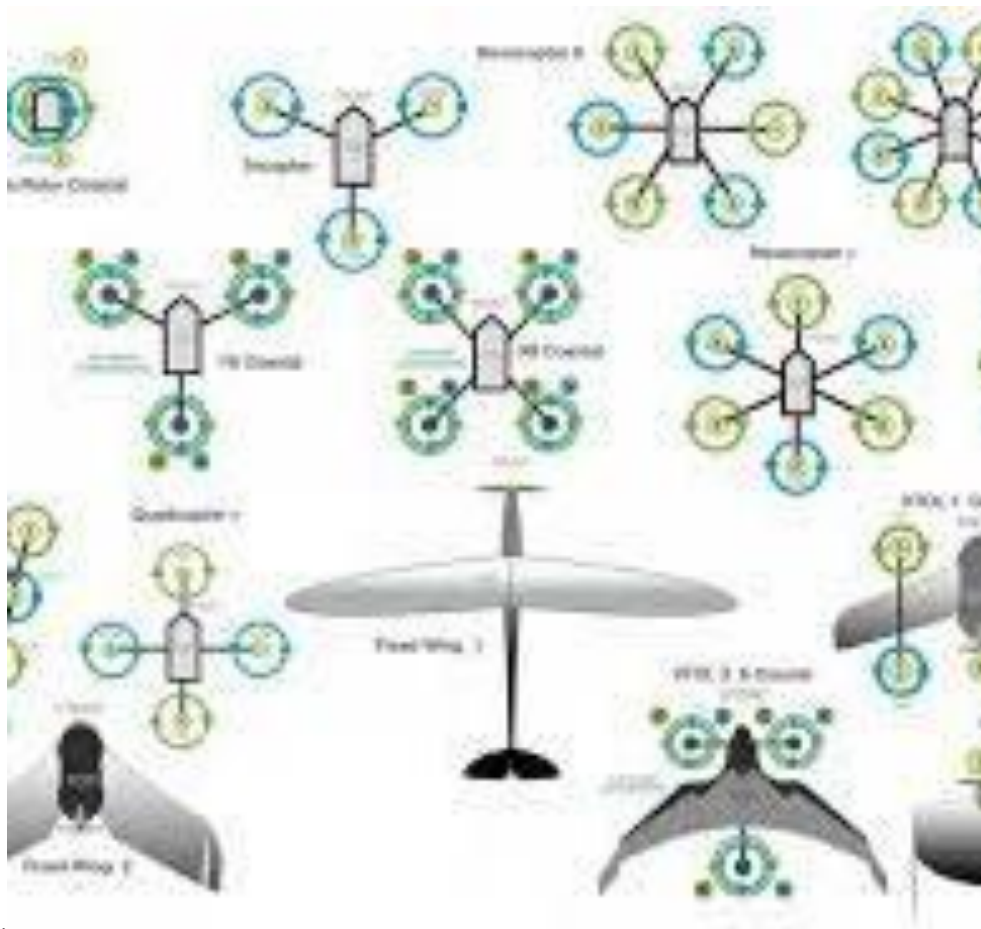


Рис. 1- Види дронів

Дрони класифікують за різними критеріями: кількістю та розташуванням гвинтів або крил, мети використання, дальності польоту, маси корисного навантаження, базового механізму, приводних шестерень та ін.



Рис. 2 –Привідні шестерні з асиметричним профілем зубів безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Оригінальні зубчасті пари мають достатню вантажопідйомність, щоб витримувати підвищену потужність нових двигунів і не потребують модернізації. Циліндричні зубчасті передачі були перероблені для зниження рівня контактної напруги та достатньої міцності на поверхні зубця (Рис. 2).

Основні параметри розроблених та модернізованих циліндричних зубчастих передач представлені у таблиці 1.

Таблиця 1- Основні параметри розроблених та модернізованих циліндричних зубчастих переа

| Геометрія колеса | | Оригінальна | Модернізація |
|------------------------------|----------|-------------|--------------|
| Профіль зуба | | Симетричний | Асиметричний |
| Кількість зубів | Шестерня | 7-15 | 7-15 |
| | Колесо | 14-37 | 14-37 |
| Основний модуль стійки | | 0,5 – 0,9 | 0,5 – 0,9 |
| Модифікація додавання | Шестерня | 0.25 | N/A |
| | Колесо | 0.08 | AS |
| Робочий модуль | | 0,5 – 0,9 | 0,5 – 0,9 |
| Основний кут тиску у стійці | | 20° | AS |
| Кут робочого тиску | | 21,02° | 30°/20°* |
| Коефіцієнт робочого контакту | | 1.35 | 1.22/1.48* |
| Геометрія колеса | | Оригінальна | Модернізація |
| Профіль зуба | | | Асиметричний |
| Кількість зубів | Шестерня | 7-15 | 7-15 |
| | Колесо | 14-37 | 14-37 |
| Основний кут тиску у стійці | | 28° | AS |
| Кут робочого тиску | | 29.28 | 32°/20°* |
| Коефіцієнт робочого контакту | | 1.20 | 1.30/1.57* |

Параметри асиметричних зубів були обрані для забезпеченням таких вимог:

- кут нахилу фланця приводу не повинен перевищувати 30°, щоб обмежити максимальне радіальне навантаження та зберегти оригінальні підшипники;
- мінімальний коефіцієнт контакту фланця приводу – 1,3;
- мінімальний кут тиску бічної поверхні берега на 2-му ступені становить 20°, так як бічні поверхні однієї з гілок коробки передач використовується для передачі крутного моменту на хвостовий гвинт;
- фінішна обробка кореня зуба не подрібнюється, його профіль не повинен заважати траєкторії шліфувального круга.

Перед чистою обробкою зубці зубчастої передачі було, залишено шліфувальний шар близько 0,05 мм на боках зубців та забезпечивши остаточний профіль асиметричних зубів. В кореневій частині зубів виникають залишковою напруги, які зникають після шліфування, що збільшує міцність на вигин зуба. Для цього потрібні зубчасті вали з виступом. Однак через низьку кількість зубців шестірні звичайні модульні фрези не могли забезпечити необхідний профіль поверхні кореня зуба, що зменшує локальну концентрацію напруги і ймовірність виникнення мікротріщин[7]. Це відбувається через те, що поверхня профіля зуба передач з шістьма низькими зубцями генерується з меншою кількістю розрізів ніж одна для зубчастих передач з великою кількістю зубів. Щоб вирішити цю проблему, бічні поверхні шестерні були оброблені звичайними модульними фрезами (без виступів), а потім перед фінішною обробкою зубчастих коліс було вирівняно корінь впадини зуба[2]. Зубчасті профілі перед та після фінішної обробки показані на рис. 3.

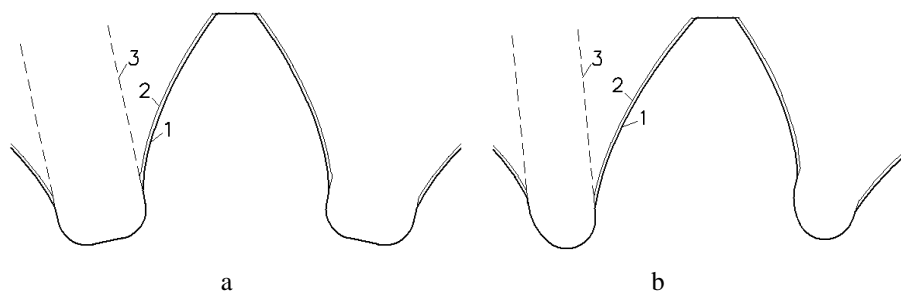


Рис. 3 - Зубчасті профілі ступеня; а – оригінальна симетрична, б – асиметрична; 1 - після формування профіля спеціальною фрезою с протуберанцем, 2 - до фінішного формоутворення евольвентної поверхні, 3 – фінішне формоутворення асиметричної евольвентної поверхні

Перед фінішною обробкою шестерні як другого, так і третього ступеня були оброблені за допомогою валиків виступів. Зубчасті профілі зубчастих коліс 3-го ступеня до, та після фінішної обробки показані на рис. 4.

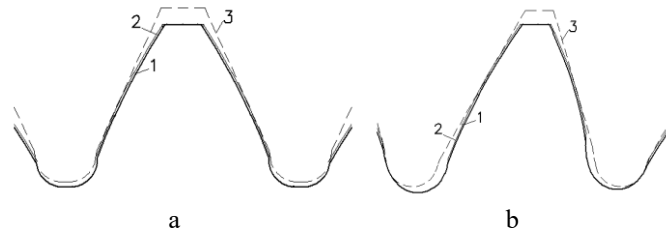


Рис 4.- Формоутворення асиметричної евольвентної поверхні а – оригінальна симетрична, б – асиметрична; 1 - після формування профіля спеціальною фрезою с протуберанцем., 2 - до фінішної обробки, 3 - остаточне формоутворення асиметричного профіля

Геометрія асиметричних зубів не дозволяє використовувати традиційне рівняння для визначення напруги вигину зуба[6]. Підпрограма, інтегрована у програмне забезпечення яке використовувалося для порівняння симетричних та асиметричних навантажень на вигин зубів. Кінцеві елементи дозволяють адекватно описати все різноманіття конструкцій і деталей. Метод кінцевих елементів відноситься до варіаційних методів теорії пружності і дозволяє оцінювати напружено-деформований стан плоских і об'ємних елементів конструкцій. Для моделювання деформованого стану зуба в даній роботі були використані модулі пакету APM WinMachine: APM Structure3D. Модель зуба формувалася шляхом вирізання зуба із зубчастого колеса двома площинами, проведеними через середини сусідніх западин і вісь обертання. Отриманий сектор відсікався площиною, перпендикулярною осі симетрії зуба на відстані від його основи, що дорівнює приблизно двом модулям зачеплення, що менше мінімальної рекомендованої товщини обода зубчастого колеса. Кінцеві елементи формувалися площинами, проведеними з певним кроком по довжині зуба і перпендикулярно осі симетрії зуба. Був закладений варіант навантаження, що відповідає послідовному застосуванню розподіленого навантаження по висоті зуба. У першому наближенні навантаження по довжині зуба вважалося рівномірно розподіленим. Характер об'ємної деформації зуба, отриманої при застосуванні методу кінцевих елементів, представлений на рис. 5.

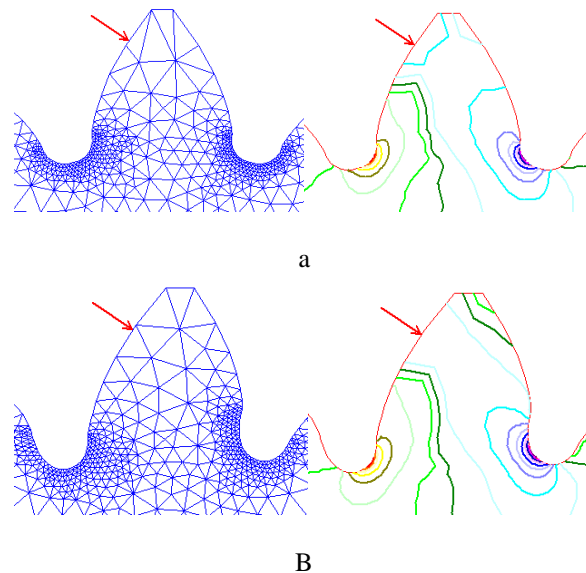


Рис. 5. Схема об'ємної деформації зуба при експлуатації зубчастого колеса 3-го ступеня та ізотропії напруг; а – оригінальна симетрична, б – асиметрична

Підбиваючи підсумок викладеному, можна констатувати, що найбільш ефективно забезпечення експлуатаційних властивостей асиметричних зубчастих коліс здійснюється із застосуванням комплексних параметрів стану контактуючих поверхонь.

Всі шестерні виконані із полімідних матеріалів, текстоліту марок ПТ та ПТК, капролону, поліформальдегіду, фенілону та ін..

Положення заготовки шестірни під час обробки повинно забезпечувати асиметричні зубці, спрямовані у певному напрямку за годинниковою стрілкою. При базуванні заготовки та її закріпленні повинен дотримуватися принципу єдності баз.

Асиметричні передачі потребують спеціального налаштування та зубооброблюючого інструменту для формоутворення евольвентного профілю зубців.

Висновки. Застосування асиметричних зубчастих коліс для надійного обертання гвинтів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) забезпечує необхідну кінематичну точність привідних шестерень, норми плавності, норми бокового зору і одне з головних вимог це міцність зубів шестерень.

Розробка асиметричних зубчастих передач для модернізації безпілотних літальних апаратів дозволяє підсилити вантажопідйомність для використання більш потужніших двигунів. Підвищення міцності зубів привідних шестерень дає можливість виготовляти їх з поліамідних матеріалів.

Заміна звичайних симетричних зубчастих коліс для зубчастих передач на зубчасті колеса з асиметричним профілем дозволила використовувати потужніші та економічні двигуни без модернізації корпусу привода.

Список літератури:

- 1 Васильченко Я. В., Мироненко О. Є., Підвищення довговічності важконавантажених зубчастих передач за рахунок зміни профіля на асиметричний // Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». Львів – Звенів (Карпати), 18-21 лютого 2025 року. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. – С. 29. 2
- 2 Мироненко О.Є. Профільювання черв'ячних фрез з протуберанцем для обробки асиметричних великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 28 – 31 травня 2025 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. – С. 147–149. ISBN 978-617-7893-02-7
- 3 Васильченко Я.В., Мироненко О.Є. Асиметричні зубчасті передачі для редукторів у важкому машинобудуванні. Матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конф. (17-19 вересня 2024 р., м. Херсон, м. Хмельницький). С - 135 . ISBN 978-617-8187-33-0 (електронне видання)
- 4 Пасечник В.А., Охрименко О.А., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Федоренко В.С. Ефективний метод підвищення зносостійкості зубчастих коліс у слідстві рівномірного розподілу локалізованого навантаження // Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023). Тези двадцять третьої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", 2023. – С. 83–85
- 5 Охрименко О.О., Камчатна–Степанова К.В., Ключко Л.В., Пермяков Є.О., Мироненко О.Є., Іванченко В.В. Аналітичний підхід прогнозування стану міцнісних параметрів асиметричних зубчастих коліс. Вісник НТУ «ХПІ». 2023. № 2 С. 126-133. ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online)
- 6 Майборода В.С., Охрименко О.О., Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Федоренко В.С., Сапон С.П., Манохін А.С., Шаповалов М.В. Процес моделювання контактної взаємодії при швидкісному зубофрезуванні великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20–22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.
- 7 Васильченко Я.В., Ковальов В.Д., Шаповалов М.В., Мироненко О.Є., Гасанов М.І., Ключко О.О., Заковоротний О.Ю., Виникнення і розвиток тріщин зубчастих коліс. Інформатика, управління та штучний інтелект . Тези одинадцяті міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", 2024. – С. 17-21.
- 8 Основи наукових досліджень. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>(дата звернення: 09.01.2025).

References (transliterated)

- 1 Vasylenko, Ya. V., & Myronenko, O. Ye. (2025, February 18–21). *Pidvyshchennia dovhovichnosti vazhkonavantazhenykh zubchastykh peredach za rakhunok zminy profilia na asymetrychnyi* [Increasing the durability of heavily loaded gear transmissions by modifying the profile to asymmetric]. In **Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Progressyvi tekhnologii v mashynobuduvanni"** (p. 29). Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi Politekhniky.
- 2 Myronenko, O. Ye. (2025, May 28–31). *Profilyuvannia cherv'iachnykh frez z protuberantsem dlia obrobky asymetrychnykh velykomodul'nykh zubchastykh koles* [Profiling of worm cutters with protuberance for machining asymmetric large-module gears]. In V. D. Kovalov (Ed.), **Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku**. Proceedings of the 21st International Scientific and Technical Conference (pp. 147–149). Kramatorsk–Ternopil: DDMA. ISBN 978-617-7893-02-7.
- 3 Vasylenko, Ya. V., & Myronenko, O. Ye. (2024, September 17–19). *Asymetrychni zubchasti peredachi dlia reduktoriv u vazhkomu mashynobuduvanni* [Asymmetric gear drives for gearboxes in heavy engineering]. In **Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference** (p. 135). Kherson–Khmelnitskyi. ISBN 978-617-8187-33-0.
- 4 Pasechnyk, V. A., Okhrymenko, O. A., Hasanov, M. I., Zakovorotnyi, O. Yu., Klochko, O. O., & Fedorenko, V. S. (2023). *Efektivnyi metod pidvyshchennia znosostiikosti zubchastykh koles u slidstvi rivnomirnoho rozpodilu lokalizovanoho navantazhennia* [Effective method for improving gear wear resistance through uniform distribution of localized loading]. In **Problems of Informatics and Modeling (PIM-2023)**. Proceedings of the 23rd International Scientific and Technical Conference (pp. 83–85). Kharkiv: NTU "KhPI".
- 5 Okhrymenko, O. O., Kamchatna–Stepanova, K. V., Klochko, L. V., Permiakov, Ye. O., Myronenko, O. Ye., & Ivanchenko, V. V. (2023). *Analitichnyi pidkhid prohozuvannia stanu mitsnisnykh parametriv asymetrychnykh zubchastykh*

koles [Analytical approach to predicting the strength parameters of asymmetric gears]. *Visnyk NTU "KhPI"*, (2), 126–133. ISSN 2079-004X (Print), ISSN 2786-7587 (Online).

6 Maiboroda, V. S., Okhrymenko, O. O., Klochko, O. O., Hasanov, M. I., Zakovorotnyi, O. Yu., Fedorenko, V. S., Sapon, S. P., Manokhin, A. S., & Shapovalov, M. V. (2023, June 20–22). *Protse modeliuвання kontaknoi vzaiemodii pry shvydkisnomu zubofrezuvanni velykomodul'nykh zubchastykh koles* [Modeling contact interaction in high-speed gear hobbing of large-module gears]. In V. D. Kovalov (Ed.), **Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Proceedings of the 21st International Scientific and Technical Conference** (pp. 83–85). Kramatorsk–Ternopil: DDMA. ISBN 978-617-7889-45-7.

7 Vasylenko, Ya. V., Kovalov, V. D., Shapovalov, M. V., Myronenko, O. Ye., Hasanov, M. I., Klochko, O. O., & Zakovorotnyi, O. Yu. (2024). *Vynyknennia i rozvytok trishchyn zubchastykh koles* [Occurrence and development of cracks in gears]. In **Informatyka, upravlinnia ta sztuchnyi intelekt. Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference** (pp. 17–21). Kharkiv: NTU "KhPI".

8 *Osnovy naukovykh doslidzhen*. (n.d.). Retrieved January 9, 2025, from <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>

Надійшла (received) 12.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Васильченко Яна Василівна (Vasylchenko Yana) – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-8827>

Мироненко Олег Євгенович (Myronenko Oleh) – аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; e-mail: om7251975@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6626-5629>

М. О. ВЖЕСНЕВСЬКИЙ, О. О. ЧАЛА

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ ЗАСОБАМИ-ШАТЛАМИ В ЛОГІСТИЦІ СКЛАДІВ

Досліджено можливість автоматичного керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розробки математичних моделей та методу керування рухом. Особлива увага приділяється дослідженню електромеханічних процесів, що відбуваються в системі керування, що забезпечують оптимальний вибір швидкості руху шатла.

Визначено умови та параметри, що впливають на рух шатлу. Приділено увагу резонансним режимам та методам ймовірності їх виникнення. Математичну модель представлено в декількох еквівалентних формах, що дає змогу вибрати найзручніший варіант для розв'язання конкретного інженерного завдання. Модель можна використати для дослідження різних режимів роботи роботизованого шатла, а також для розроблення й оптимізації систем керування, спрямованих на підвищення енергоефективності та гнучкості логістичних процесів.

Ключові слова: автоматизація, логістика, транспортування, ідентифікація, оптимізація, моделювання, системи підтримки прийняття рішень, функція прийняття рішень, мобільний робот, транспортувальний шатл, розпізнавання об'єктів, проблема лінійності, проблема керуваності.

M. O. VZHESNIEVSKYI, O.O. CHALA

AUTOMATIC CONTROL OF ROBOTIC SHUTTLE VEHICLES IN WAREHOUSE LOGISTICS

The possibility of automatic control of transport robotic vehicles-shuttles in warehouse logistics, taking into account energy efficiency requirements, through the development of mathematical models and a method of motion control, was studied. Special attention is paid to the study of electromechanical processes taking place in the control system, which ensure the optimal selection of the shuttle speed.

The conditions and parameters affecting the movement of the shuttle are determined. Attention is paid to resonant modes and methods of the probability of their occurrence. The mathematical model is presented in several equivalent forms, which makes it possible to choose the most convenient option for solving a specific engineering problem. The model can be used to study different operating modes of the robotic shuttle, as well as to develop and optimize control systems aimed at increasing energy efficiency and flexibility of logistics processes.

Keywords: automation, logistics, transportation, identification, optimization, modeling, intelligent systems, decision support systems, decision-making function, mobile robot, transport shuttle, object recognition, linearization problem, controllability problem.

1. Вступ.

В умовах сучасного ринку, що характеризується високою конкуренцією, ефективність логістичних процесів відіграє ключову роль в успіху будь-якого підприємства. Оптимізація роботи складів, як найважливішої складової частини логістичної системи, дає змогу істотно знизити витрати і підвищити якість обслуговування клієнтів [1].

Одним із найперспективніших напрямків у розвитку складської логістики є автоматизація та використання роботизованих систем. Автоматичні транспортні роботи-шатли набувають дедалі більшого поширення, забезпечуючи високу швидкість і точність виконання операцій, а також зниження витрат [2].

Однак, впровадження автоматичних роботехнічних шатлів породжує низку нових викликів, пов'язаних із розробкою ефективних систем управління та їхньою інтеграцією в складне динамічне середовище складу.

Ключові проблеми, які необхідно розв'язати під час розроблення систем управління шатлами:

- забезпечення плавного, точного та енергоефективного руху робота-шатла в різних умовах навантаження і зовнішніх впливів;
- запобігання виникненню резонансних явищ, які можуть призвести до пошкодження шатла або обладнання складу;
- інтеграція шатлів у єдину систему управління складом, забезпечуючи їхню координовану роботу та оптимальне виконання завдань.

Таким чином, дослідження розробки моделей та методів роботизованих засобів-шатлів для удосконалення систем автоматизації складської логістики, з урахуванням вимог енергоефективності, є актуальним та своєчасним науково-прикладним завданням.

2. Мета дослідження.

Дослідження спрямовані на розробку моделей та методів автоматичного керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів з урахуванням вимог енергоефективності.

Особлива увага приділяється дослідженню електромеханічних процесів, що відбуваються в системі, і розробці алгоритмів керування, що забезпечують оптимальний вибір швидкості руху шатла.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування транспортувальними роботизованими засобами-шатлами в автоматизованих внутрішньоскладських системах.

Предметом дослідження є параметри керування та математичні, що описують процеси автоматичного керування транспортувальними роботизованими засобами-шатлами.

. Викладення основного матеріалу та результати.

Для створення ефективної системи керування автоматичним роботизованим транспортним засобом-шатлом необхідно розробити математичну модель, яка адекватно описує динаміку руху.

Авторами було використано рівняння Лагранжа 2-го роду для отримання роботизованою моделі шатла. Цей підхід дає змогу врахувати взаємодію механічних та електричних компонентів системи.

Приклад конструктивного оформлення автоматичного транспортувального засоба-шатла, який є різновидом мобільного робота для переміщення вантажів проміж рядами стелажів показаний на рис. 1.



Рис. 1 – Загальний вигляд (а) та внутрішня будова (б) шатла (мобільного робота) для внутрішньо-складського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Karpelou [3]

Автоматичний робот-шатл це платформа на чотирьох колесах, на якій з одного боку колеса, що забезпечують рух, а з іншого – підтримку, посередні передбачено платформу для розміщення вантажу.

Рушійні зусилля роботизованого шатлу приводяться в дію електроприводами. Треба відмітити, що такі електроприводи є екологічно безпечними і не забруднюють шкідливими викидами закрите приміщення для складування, не утворюються випари, що дає можливість використовувати такі види роботизованих шатлів на спеціальних складах (наприклад для складування фармацевтичної продукції, а продукції з особливими умовами зберігання) [4].

Такі конструкції, як правило є, в більшості своїй, лише механізованими: до шатлу прикріплено канат, який тягне його, а ось таких роботизованих автоматичних засобів шатлів, наразі, є не багато, вони ще не здобули широкого розповсюдження.

Також нами запропонована така конструкція роботизованого шатлу, де вантаж розташовується по центру конструкції. Саме це дає можливість компактного розташування вузлів з системою з висувом (рис. 2), що ще надає можливість для руху шатлу у двох напрямках без його розвороту.

На рис. 2 представлено розроблені авторами у загальна (а), кінематична (б) схеми та еквівалентна електрична схема електродвигунів (в) роботизованого автономного засоба-шатла.

Під час розроблення моделі особливу увагу приділяли вибору типу електродвигунів, врахуванню сил тертя і в'язкого опору.

Вибір електродвигунів істотно впливає на характеристики руху шатла [6-10], такі як швидкість, прискорення та енергоспоживання. Врахування сил тертя і в'язкого опору важливе для забезпечення точності моделювання, оскільки ці сили впливають на динаміку руху та енергоефективність системи.

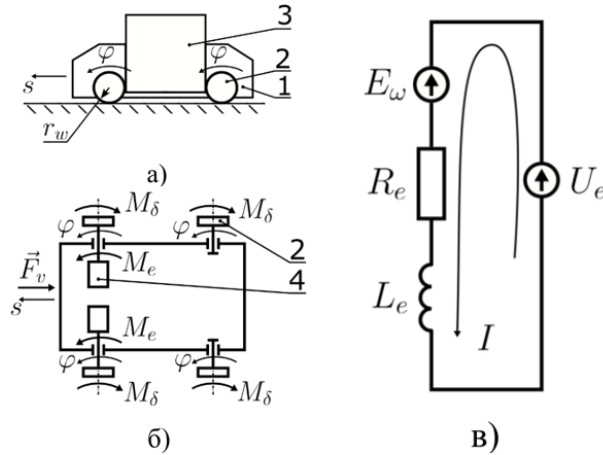
Схеми (рис. 2) та формули (1,2) допомагають зрозуміти взаємозв'язок механічної та електричної частин роботизованого транспортного засобу-шатла, що важливо для побудови його математичної моделі та розробки алгоритмів управління.

Для проведення досліджень було запропоновано математичної моделі з рівнянням руху для механічної системи шатла (1) та (2) рівняння електродинаміки для електродвигуна шатла.

Рівняння (1) описує механічну частину системи шатла. Воно містить момент інерції J і показує, як змінюється кутове прискорення q під впливом сил, зокрема демпфуючої сили: Bq_1 та Bq_2 , електромеханічного

зв'язку і гравітаційної сили $mg\delta$.

Рівняння (2) описує електричну динаміку двигуна, тобто зміну струму q_2 , q_2 обмотках електродвигуна під впливом напруги $U_e(t)$, $U_e(t)$, електричного опору R_{eq1} , R_{eq2} та електро механічного зворотного зв'язку $B_e q_1$, $B_e q_2$



1 – шасі; 2 – колесо; 3 – вантаж; 4 – електричний двигун
 Рис. 2 – Загальна (а), кінематична (б) схеми та еквівалентна електрична схема електродвигунів (в) роботизованого автоматичного засоба-шатла внутрішньо-складського транспортування

Тоді, маємо узагальнені сили для роботизованого транспортувального засоба-шатла в такому вигляді, що описує та відповідає запропонованій схематизації на рис. 2:

$$J\ddot{q}_1 = -B\dot{q}_1 + 2B_e\dot{q}_2 - mg\delta, \tag{1}$$

$$L_e\ddot{q}_2 = -B_e\dot{q}_1 - R_e\dot{q}_2 + U_e(t). \tag{2}$$

Отримана математична модель дає змогу дослідити перехідні процеси, що виникають під час зміни швидкості, прискорення або напрямку руху роботизованого автономного шатла.

Аналіз цих процесів дає змогу визначити оптимальні параметри керування, що забезпечують плавність руху та мінімізацію енерговитрат.

На основі аналізу перехідних процесів можна оптимізувати рух шатла для підвищення ефективності та енергозбереження.

На подальших етапах важливим аспектом моделювання є врахування нелінійності, зумовленої, наприклад, властивостями сили тертя кочення.

Для розв'язання цієї проблеми можна використовувати методи лінеаризації для окремих режимів руху, що спрощує аналіз і дає змогу отримати аналітичні рішення для деяких задач

Перевагою таких підходів є те, що розроблену математичну модель представлено в декількох еквівалентних формах (3-5) що дає змогу вибрати найзручніший варіант для розв'язання конкретного інженерного завдання. Модель можна використати для дослідження різних режимів роботи роботизованого шатла, а також для розроблення й оптимізації систем керування, спрямованих на підвищення енергоефективності та гнучкості логістичних процесів.

$$\omega(t_0) = \omega_0, I(t_0) = I_0. \tag{3}$$

$$\dot{q}_1 = \omega(t), \dot{q}_2 = I(t), q_1(t_0) = \varphi_0, q_2(t_0) = \kappa_0. \tag{4}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -B\omega + 2B_e I - mg\delta, L_e \frac{dI}{dt} = -B_e\omega - R_e I + U_e(t) \tag{5}$$

На основі огляду конструкції роботизованого транспортувального засобу-шатла розроблено його схематизацію у вигляді електромеханічної системи, стан якої визначено кутом повороту коліс та електричним зарядом в обмотуваннях роторів рушійних електричних двигунів

Математичну модель транспортувального засоба-шатла було побудовано за допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду з використанням електромеханічних аналогій у вигляді системи двох звичайних нелінійних

диференціальних рівнянь другого порядку із відповідною кількістю початкових умов. Показано що нелінійність диференціальних рівнянь математичної моделі є наслідком врахування властивостей сили тертя кочення коліс та встановлено можливості лінеалізації диференціальних рівнянь для дослідження окремих режимів руху.

Було досліджено диференціальні рівняння математичної моделі транспортувального засобу-шатла, та показано що такі диференціальні рівняння можуть бути представлені у трьох еквівалентних формах. Математична модель транспортувального засоба-шатла може бути еквівалентно зведена звичайного диференціального нелінійного рівняння другого порядку відносно кутової швидкості коліс із відповідними початковими умовами. Також можлива еквівалентна форма представлення математичної моделі транспортувального засоба-шатла у вигляді звичайного диференціального рівняння другого порядку відносно сили струму в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів із відповідними початковими умовами.

Дослідження процесів в транспортувального засоба-шатла виконані на основі лінеаризованих математичних моделей. Показано що усталені процеси в транспортувального засоба-шатла характеризуються нелінійною залежністю між усталеним значенням кутової швидкості коліс і сили струму в обмотуванні ротору та живильною напругою рушійних електричних двигунів. Нелінійності між параметрами стану усталених процесів обумовлені властивостями тертя кочення коліс. Встановлено, що перехідні процеси в транспортувального засоба-шатла при його зрушенні з нерухомого стану істотно залежать від вигляду характеристичних коренів лінеаризованого диференціального рівняння математичної моделі. У випадку дійсних коренів маємо монотонне збільшення кутової швидкості від поточного до нового усталеного значення, але при комплексно спряжених коренях характеристичного рівняння таке збільшення є немонотонним.

Таким чином перехідним процесам у випадку комплексно спряжених коренів характеристичного рівняння притаманна немонотонна зміна кутової швидкості коліс, що необхідно враховувати при проєктування систем автоматизації нового покоління автоматичних транспортувальних засобів-шатлів складської логістики

Надалі авторами було прийнято рішення для забезпечення точного і плавного керування рухом автоматичного транспортного засобу-шатла використовуються ПІД-регулятори (рис. 3), що дають змогу регулювати швидкість і переміщення та додають в такі системи елементи інтелектуалізації в керуванні.

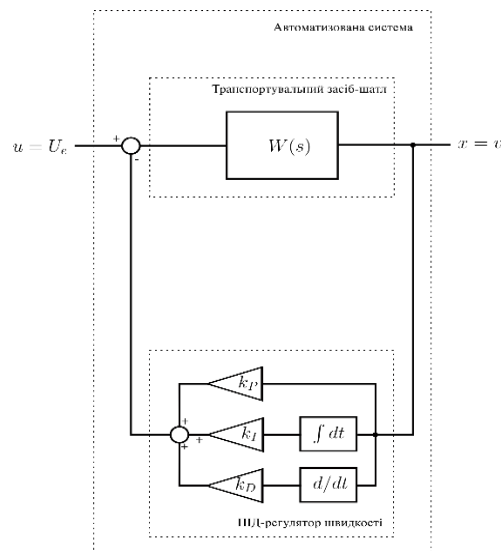


Рис. 3 Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД-регулятором швидкості

ПІД-регулятори дають змогу точно регулювати швидкість руху шатла, забезпечується точний контроль переміщення шатла до заданої позиції. Це зумовлює нові завдання, яким є оптимальне налаштування параметрів ПІД-регуляторів.

Важливим завданням є налаштування параметрів ПІД-регуляторів для досягнення оптимальних характеристик керування. Для автоматичного транспортного засобу-шатла необхідно забезпечити мінімальні відхилення від бажаної швидкості під час перевезення вантажів.

Для досягнення цієї мети параметри ПІД-регулятора мають бути налаштовані таким чином, щоб компенсувати вплив зовнішніх впливів, таких як сили тертя і зміни навантаження. Необхідно забезпечити мінімальні відхилення від бажаної швидкості під час перевезення вантажів. Параметри ПІД-регулятора мають бути налаштовані таким чином, щоб компенсувати вплив зовнішніх впливів, таких як сили тертя і зміни навантаження.

Вибір параметрів ПІД-регуляторів здійснюється за допомогою комп'ютерного моделювання з урахуванням умов стійкості. Умови стійкості, отримані з використанням критерію Рауса і критерію Гурвіца, визначають допустимі значення параметрів, що гарантують стабільну роботу системи, а комп'ютерне моделювання дає змогу перевірити роботу системи з різними налаштуваннями, не піддаючи ризику реальне

обладнання.

Експериментальні дослідження та створений випробувальний стенд можуть бути використані для розроблення практичних рекомендацій щодо налаштування ПІД-регуляторів. На рис. 4 – Структурні схеми автоматизованої системи роботизованого транспортувального засоба-шаттла із автоматичним ПІД-регулятором комбінованим лінійним (а) та автоматичним ПІД-регулятором комбінованим нелінійним (б)

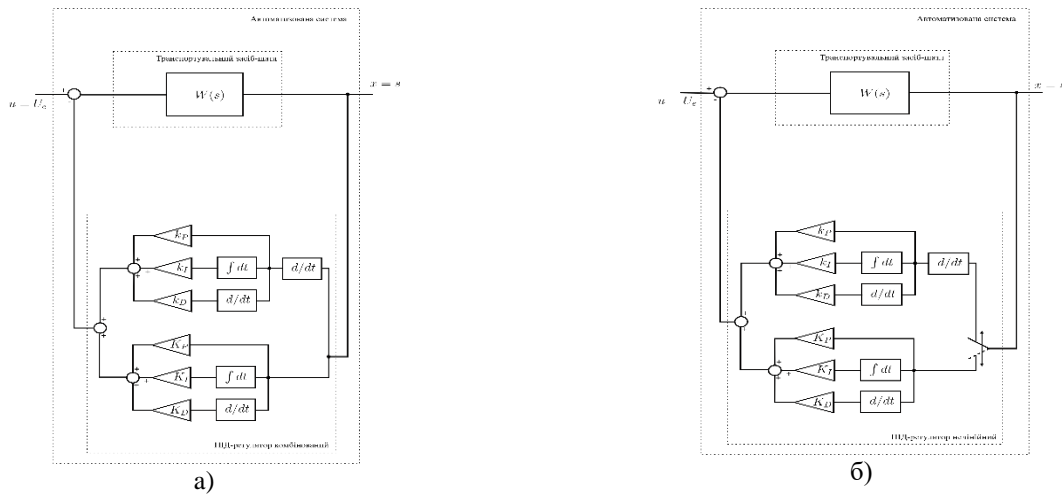


Рис. 4 – Структурні схеми автоматизованої системи роботизованого транспортувального засоба-шаттла із автоматичним ПІД-регулятором комбінованим лінійним (а) та автоматичним ПІД-регулятором комбінованим нелінійним (б)

У дослідженні, розроблено математичні моделі систем управління, що базуються на ПІД-регуляторах. Ці моделі представлено у вигляді лінійних диференціальних рівнянь третього та четвертого порядків. На основі запропонованих математичних моделей досліджено амплітудно-частотні характеристики процесів керування та показано можливість виникнення резонансних режимів.

Отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій і ПІД-регуляторів шаттла для запобігання резонансних процесів:

Функція (6) представляє собою поліном восьмого ступеня:

$$\varphi(\omega) = a_2^2 \omega^8 + (a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^6 + (a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^4 + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) \omega^2 + K_I^2. \quad (6)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (6), використаємо її похідну:

$$\frac{d\varphi}{d\omega}(\omega) = 8a_2^2 \omega^7 + 6(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^5 + 4(a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^3 + 2(K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) \omega. \quad (7)$$

Стаціонарні точки (6) визначаються рівністю нулю першої похідної (7):

$$\omega = 0, \quad (8)$$

$$4a_2^2 \omega^6 + 3(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^4 + 2(a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^2 + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) = 0. \quad (9)$$

Як свідчить рівняння (9) у випадку дійсного кореня ω^2 матимемо три резонансних частоти, тому для уникнення таких явищ слід задовольнити:

$$\text{Im}(\omega^2) \neq 0. \quad (10)$$

де ω^2 – корінь рівняння (9).

Таким чином, маємо можливість сформулювати визначення параметрів ПІД-регулятора для автоматичного керування переміщенням, якому будуть притаманні додаткові можливості щодо уникнення

резонансних явищ.

Наступними проблемами, що прагнули вирішити автори була інтеграція інтелектуальних систем управління:

– обмеження традиційних систем: традиційні системи управління, засновані на ПІД-регуляторах, мають свої обмеження, особливо в складних динамічних середовищах;

– необхідність адаптації: для розв'язання цієї проблеми необхідно інтегрувати інтелектуальні системи керування, здатні адаптуватися до мінливих умов;

– оптимізація роботи: інтелектуальні системи дозволяють оптимізувати роботу системи в цілому, враховуючи множину факторів.

Для розв'язання цієї проблеми необхідно інтегрувати інтелектуальні системи в керування, здатні адаптуватися до мінливих умов і оптимізувати роботу системи в цілому. Інтеграція інтелектуальних систем керування дає змогу враховувати безліч чинників, таких як: поточний стан складської системи; наявність перешкод на маршруті; розподіл завдань між роботами-шатлами.

Одним із підходів до інтеграції інтелектуальних систем є непряме керування шатлами через зміну параметрів бортових ПІД-регуляторів. Цей підхід поєднує переваги як ПІД-регуляторів, так і інтелектуальних систем. ПІД-регулятори забезпечують швидке і точне керування рухом, а інтелектуальна система відповідає за вибір оптимальних параметрів регулятора залежно від поточної ситуації.

Висновки.

Одним із важливих аспектів автоматичного керування роботизованими шатловими системами для внутрішньоскладської логістики є оптимізація швидкості руху шатла для мінімізації енергоспоживання. Витрати енергії на транспортування вантажів залежать від швидкості руху шатла, його маси та пройденої відстані. Запропоновано використання ПІД-регуляторів для підтримання значення заданих величин автоматичного керування. Використання таких підходів дозволяє аналізувати поточне завантаження системи, маршрути та обирати оптимальну швидкість руху, забезпечуючи баланс між швидкістю виконання операцій та енергоспоживанням.

Швидкість руху автоматичних транспортувальних засобів-шатлів визначається пропускною спроможністю складської логістичної системи, але через вплив швидкості на витрати електроенергії маємо можливість щодо оптимізації логістичних процесів. Для економії електричної енергії при виконанні транспортування вантажів, слід зменшувати швидкість навантаженого автоматичного транспортувального засоба-шатла, що має більший аеродинамічний опір, та відповідним чином підвищувати швидкість руху порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла для забезпечення заданого системою часу виконання операції транспортування.

У вигляді лінійного диференціального рівняння із початковими умовами отримано математичну модель процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштування ПІД-регулятора швидкості, та представлено таку модель в еквівалентній формі динамічної ланки із відповідною передавальною функцією. Показано, що перехідні процеси при зміні налаштування ПІД-регулятора швидкості істотно залежать від конструкції автоматичного транспортувального засоба-шатла та параметрів його ПІД-регулятора швидкості.

Автори висловлюють подяку за всебічну підтримку доктору технічних наук, професору Ігорю Шакировичу Невлюдову –Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату Державної премії в галузі науки і техніки України; Лауреату Державної премії України в галузі освіти, завідувачу кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, ХНУРЕ; колективу Студентського конструкторсько-технологічного бюро «Робототехніка та мехатроніка» кпфедри КІТАР, ХНУРЕ; компаніям CAPELOU Europe GmbH (Німеччина), ТОВ «КАПЕЛОУ» (Україна, м. Київ) та ТОВ «Омега» (Україна, м. Харків).

Список літератури:

1. Nevliudov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & Vzhesnievskyi Maksym. (2023). Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 157–170. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/202>
2. Nevliudov, I., Vzhesnievskyi, M., Romashov, Y. i Chala, O. (2023) «Математичне моделювання мехатронних шатлів як об'єктів автоматизації для багаторівневих систем внутрішньоскладської логістики», *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4 (26), с. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135.
3. Вжесневський М., Чала О. Автоматизація внутрішньо-складських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції Industry 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність // *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. – 2024. – № 2(76). – С. 34–38.
4. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products *Industrial Logistics* / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // *Decision support systems in project and program management* : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
5. Vizir, Y., & et al. (2024). Lighting Control Module Software Development. *Journal of Universal Science Research*, 2(2), 29–42
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // *CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023)* : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. Beskorovainyi V., Draz O. (2021) Mathematical models of decision support in the problems of lo-gistics networks optimization. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (18), 5–14. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.005>

9. Гіль, А., Чала, О., Филипенко, О. (2021). Промислові інтерфейси та протоколи передачі даних інтегрованих систем для автоматизованого управління в умовах Industry 4.0. Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 127-30
10. A. Perekrest, I. Konokh and M. Kushch-Zhyrko, "Administrative Buildings Heating Automatic Control Based on Maximum Efficiency Criterion," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 202-205, doi: 10.1109/MEES.2019.8896517.
11. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Nuclear and radiation safety.– 3(91). – 2021. – p. 43-50. DOI:10.32918/nrs.2021.3(91).05

References (transliterated)

1. Nevliudov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & Vzhesnievskiy Maksym. (2023). Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 157–170. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/202>
2. Nevliudov, I., Vzhesnievskiy, M., Romashov, Y. i Chala, O. (2023) Matematychnе modeliuвання mekhatronnykh shatliv yak ob'ektiv avtomatyzatsii dlia bahatorivnevnykh system vnutrishnoskladskoi lohistyky [Mathematical modeling of mechatronic shuttles as an objective of automation for complex intra-warehouse logistics systems], Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti, (4 (26), c. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135 [in Ukrainian]
3. Vzhesnievskiy, M., & Chala, O. (2024). Avtomatyzatsiia vnutrishno-skladskykh vyrobnychykh lohistrychnykh protsesiv dlia vprovadzhennia kontseptsii Industry 4.0: enerhooschadlyvist, produktyvnist, mobilnist, modulnist, avtonomnist. Systemy upravlinnia, navihratsii ta zviazku: Zbirnyk naukovykh prats, (2[76]), 34–38.
4. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products Industrial Logistics / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // Decision support systems in project and program management : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
5. Vizir, Y., & et al. (2024). Lighting Control Module Software Development. Journal of Universal Science Research, 2(2), 29–42
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. <https://doi.org/10.30837/MMP.2024.152>
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allahveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. Beskorovainyi V., Draz O. (2021) Mathematical models of decision support in the problems of lo-gistics networks optimization. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 4 (18), 5–14. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.005>
9. Hil, A., Chala, O., Fylypenko, O. (2021). Promyslovi interfeisy ta protokoly peredachi danykh intehrovanykh system dlia avtomatyzovanoho upravlinnia v umovakh Industry 4.0. Vyrobnystvo & Mekhatronni Systemy 2021: materialy V-oi Mizhnarodnoi konferentsii, Kharkiv, 127-30 [in Ukrainian].
10. A. Perekrest, I. Konokh and M. Kushch-Zhyrko, "Administrative Buildings Heating Automatic Control Based on Maximum Efficiency Criterion," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 202-205, doi: 10.1109/MEES.2019.8896517.
11. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Nuclear and radiation safety.– 3(91). – 2021. – p. 43-50. DOI:10.32918/nrs.2021.3(91).05

Надійшла (received) 02.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Максим Вжеснівський (Maksym Vzhesnievskiy) – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТдф) кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7585-628X>, e-mail: maksym.vzhesnievskiy@nure.ua.

Олена Чала (Olena Chala) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2454-3774, , e-mail: olena.chala@nure.ua .

В. І. ЛАВРІНЕНКО, В. Ю. СОЛОД, В. А. ТИЩЕНКО

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТВЕРДИХ ТА КРИХКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ШОРСТКОСТІ ЇХ ПОВЕРХОНЬ

Аналіз літературних даних засвідчив, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки і, як наслідок, різні механізми утворення шорсткості обробленої поверхні. Крім того, сучасні закордонні дослідники приділяють належну увагу поліруванню твердих сплавів і якісній різальній кромці. Показано, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість його поверхні зменшується. Це підтверджено, як на одному сплаві, так і для сукупності твердих сплавів. Причому показник R_{max} очікувано зменшується із зменшенням показника R_a , а ось поведінка відношення показників R_{max}/R_a є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає. Встановлено, що при шліфуванні шаруватих пластини, у яких сполучається різальна кераміка VOK71 та безвольфрамовий твердий сплав TN20, на кераміці фіксується більша шорсткість. Причому і тут на більш твердій кераміці фіксується і більше відношення R_{max}/R_a , як і на твердих сплавах, що свідчить про наявність на цих крихких матеріалах формування більшої кількості прихованих подряпин. Виявлено, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на незагартовану, то дещо збільшується показник R_a , а ось показник R_{max} зростає суттєво. У значній мірі це викликане саме бічними ефектами (навалами), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей S_m залишається незмінним при переході руху зерен КНБ з загартованої частини на незагартовану.

Ключові слова: твердий сплав, кераміка, крихкі матеріали, пластичні матеріали, показники шорсткості, твердість, інструментальний матеріал.

V. I. LAVRINENKO, V. Yu. SOLOD, V. A. TYSHCHENKO

MODERN RESEARCH IN THE TECHNOLOGIES OF ABRASIVE PROCESSING OF HARD AND FRAGILE TOOL MATERIALS AND DETERMINATION OF THE FEATURES OF THE FORMATION OF THE ROUGHNESS INDICATORS OF THEIR SURFACES

The analysis of literature data proved that plastic and brittle materials have different mechanisms of chip formation and, as a result, different mechanisms of roughness of the treated surface. In addition, modern foreign researchers pay due attention to the polishing of hard alloys and a high-quality cutting edge. It is shown that with an increase in the hardness of a hard alloy, the roughness of its surface decreases. This is confirmed both on one alloy and for a set of hard alloys. Moreover, the R_{max} indicator decreases as expected with a decrease in the R_a indicator, but the behavior of the R_{max}/R_a indicator ratio is unexpected and increases as the hardness of hard alloys increases. It was established that when grinding layered plates, in which cutting ceramics VOK71 and tungsten-free hard alloy TN20 are combined, a higher roughness is recorded on the ceramics. And here, too, a larger R_{max}/R_a ratio is recorded on harder ceramics, as well as on hard alloys, which indicates the presence of the formation of a larger number of hidden scratches on these fragile materials. It was found that as soon as the cBN grain passes through the hardened steel and hits the unhardened one, the R_a indicator increases slightly, while the R_{max} indicator increases significantly. To a large extent, this is caused by the side effects (clumps) that occur during the movement of grains in a mass of soft material. This is also confirmed by the fact that the step of S_m irregularities remains unchanged when the movement of the cBN grains changes from the hardened part to the unhardened part.

Key words: hard alloy, ceramics, brittle materials, plastic materials, roughness indicators, hardness, tool material.

Вступ. Практикою інструментального виробництва та застосування різального інструменту у промисловості доведено, що для досягнення ефективного та економічного використання цього сучасного високовартісного інструменту треба не тільки забезпечити високоякісну шліфовану їх поверхню, але і мати доведену різальну кромку. Це є однаковою як для інструменту з швидкорізальних сталей, коли необхідно уникнути небажаних задирок на різальному лезі, так і для твердих сплавів, керамік та надтвердих керамік, коли необхідно уникати викришування на кромці. Досягнути цього можливо не тільки шліфуванням, а і навіть поліруванням різальної кромки, коли шорсткість передньої та задньої поверхонь інструменту доводиться до R_a 0,05 мкм, а і навіть менше, що значно підвищує зносостійкість різального інструменту та якість обробленої ним поверхні. На важливість мати доведені поверхні різальних інструментів, а відтак і різальні кромки, вказували ще 50 років тому вітчизняні дослідники: Бакуль В.М., Захаренко І.П., Шепелев А.О., Грабченко А.І., Матюха П.Г. та ін. [1]. Разом з тим, нині в різальних інструментах можливе сполучення різних інструментальних матеріалів, в т.ч. пластичних та крихких. Тому, ми в даній статті і звернемо увагу на сучасні дослідження закордонних дослідників в цьому напрямку, та як це корелюється із нашими дослідженнями, що і було метою цієї статті.

Аналіз літератури. В статті [2] звертається увага на те, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки. В пластичному матеріалі стружкоутворення відбувається еластично і пластично деформується до досягнення критичної товщини стружки, а надалі утворюється стружка і відсікається від заготовки. Для крихкого матеріалу процес стружкоутворення також починається з пружної і пластичної деформації, але з-за властивостей матеріалу ця фаза є набагато меншою, ніж пластичне стружкоутворення. В цій роботі розглянуті питання виготовлення шліфувальних кругів методом адитивного виробництва. Помітне поліпшення характеристик шліфування було досягнуто за рахунок застосування термостійкої зв'язки. Встановлено, що застосування зв'язки з більш високими механічними і термічними характеристиками дозволяє забезпечити гарне утримання зерна при підвищених температурах, що сприяє зменшенню сили шліфування (до 58 % та 18 % для м'яких і твердих металів відповідно).

Перехід від пластичного до крихкого в режимі різання є важливим явищем у надточній обробці та обробці поверхні крихких матеріалів. Використовуючи нещодавно розроблений метод молекулярної динаміки, в роботі [3] досліджено вплив глибини різання на режим різання та еволюцію шорсткості. Моделювання демонструє, що модель перехідної глибини різання (transitional depth of cut – TDoC) точно передбачає механізми видалення матеріалу, на які впливають як властивості матеріалу, так і глибина різання. Коли глибина різання збільшується, робочий механізм переходить від утворення зубчастої стружки, спричиненого зсувом, до розколювання стружки (рис. 1). Дослідження середньоквадратичної шорсткості демонструє, що шорсткість є прямим результатом механізму утворення стружки і, як правило, вища, коли відбувається поломка стружки.

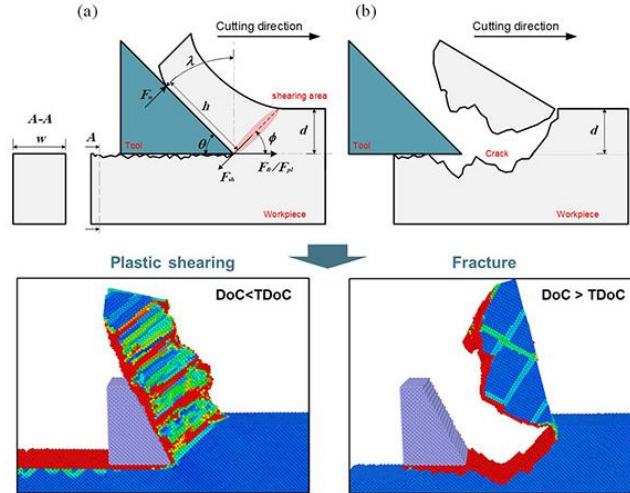


Рис. 1 – Механізми стружкоутворення та утворення шорсткості для пластичних і крихких матеріалів при моделюванні методом молекулярної динаміки [3]

Наведене вище у значній мірі відноситься і до твердих сплавів. Обробка поверхні твердого сплаву до атомарного рівня є давньою задачею в сфері виробництва і обробки матеріалів [4]. Для отримання якісних виробів з твердого сплаву в даній статті пропонується новий процес «хімічної поліровки з потовщенням зрушенням» (chemistry enhanced shear thickening polishing’ (C-STP)) із застосуванням реагенту Фентона для отримання кінцевої поліровки розміром меншим 10 нм зі швидкістю, що вдвічі перевищує швидкість звичайного STP. На рис. 2 наведений механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму–кобальт з суспензією Fenton в процесі C-STP.

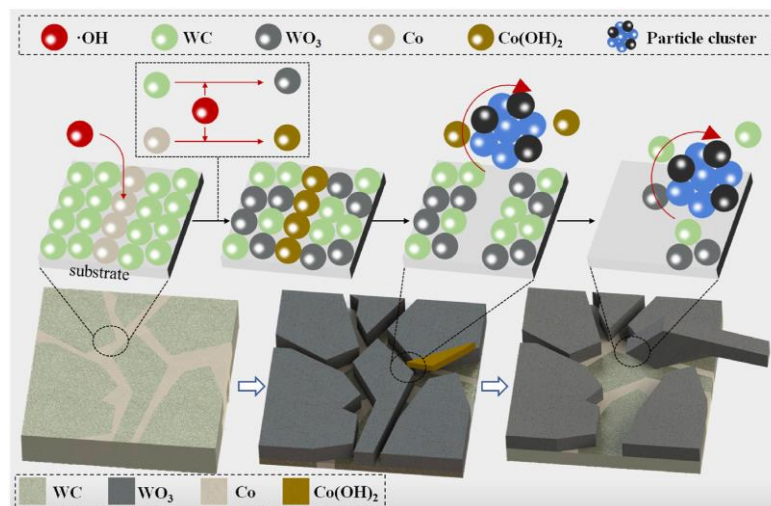


Рис. 2 – Механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму з кобальтом методом C-STP з реагентом Фентона [4]

На першому етапі елемент Co на поверхні сплаву карбід вольфраму з кобальтом спочатку окислюється до $\text{Co}(\text{OH})_2$ за рахунок сильного окислювача $\cdot\text{OH}$, оскільки він має більш низький реакційний потенціал, ніж WC. В подальшому деяка частина WC окислюється до WO_3 . Крім того, реакційний шар, що утворюється на верхній поверхні, є рихлим, що означає, що його легше видалити, ніж сплав карбіду вольфраму і кобальту. На другому етапі завдяки абразивним частинкам $\text{Co}(\text{OH})_2$ на поверхневому шарі твердого сплаву швидко

видаляється. На третьому етапі видаляється елемент Co, який є зв'язуючою фазою в твердому сплаві. Між твердою фазою WC зникають зв'язки, тому зерна WC і його рихлі оксиди відносно легко видаляються абразивними частинками. Як наслідок, свіжа поверхня знову оголюється, що може прискорити реакцію окислення, а синергія як хімічної, так і механічної дії підвищує ефективність поліровки твердого сплаву [4]. Мікросвердла (Shenzhen Jinzhou Precision Technology Co., Китай) з твердого сплаву YG-6 були вибрані для перевірки застосування C-STP з реагентом Фентона. На рис. 3 (а) представлена структура форми кромки мікросвердла після шліфування діаметром 0,4 мм, на ріжучій кромці якого чітко спостерігаються численні дефекти. Для вирішення цієї проблеми були використані методи STP та C-STP для поліровки мікросвердла протягом 3 хв. Після 3 хв. STP на ріжучій кромці все ще залишається деяка стружка і сліди шліфівки на передній поверхні. Мікросвердло після 3 хв. C-STP (із застосуванням реагенту Фентона, в % за масою: 0,1 H₂O₂ та 0,6 FeSO₄) показано на рис. 3 (б), де видно, що різальна кромка повністю згладжена, а сліди шліфівки на передній поверхні усунені. Запропонований процес C-STP допоміг знизити шорсткість поверхні твердого сплаву з вихідного значення *Sa* 120±10 нм до 8,4±0,5 нм менш ніж за 9 хв. Усунення мікродефектів на різальній кромці дозволяє, знизити інтенсивність її зношування і підвищити надійність та продуктивність процесу різання [4].

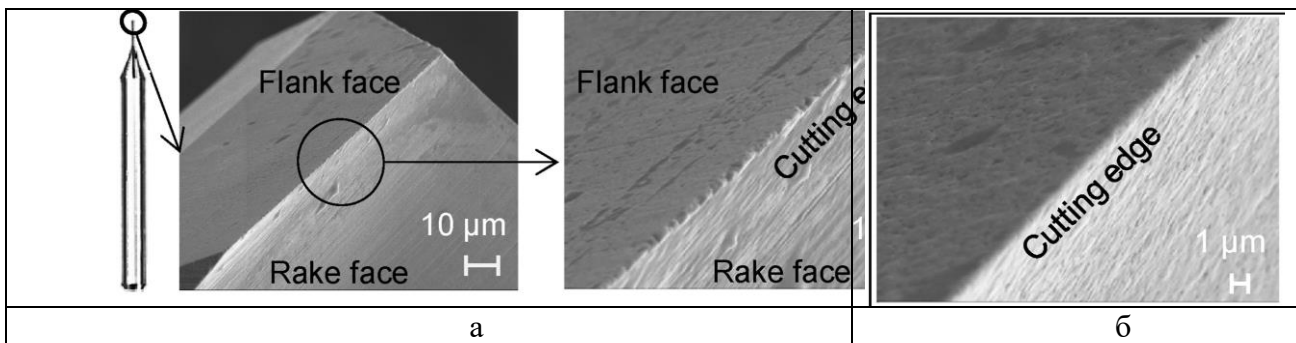


Рис. 3 – Порівняння різальної кромки мікросвердла: (а) різальна кромка без поліровки, (б) поліровка суспензією C-STP [4]

В статті [5] розроблений абразивний круг для твердофазного хіміко-механічного полірування (SPCMP) і ефективного заточування різальної кромки твердосплавного інструменту (WC-Co). Вимірювання методом дифракції рентгенівських променів і дифракції зворотного розсіяння електронів показали, що метод SPCMP видаляє приховані подряпини з поверхні матеріалів WC-Co, нанесені алмазним кругом. На рис. 4 показана взаємодія між різальним інструментом і заготовкою під час процесу різання.

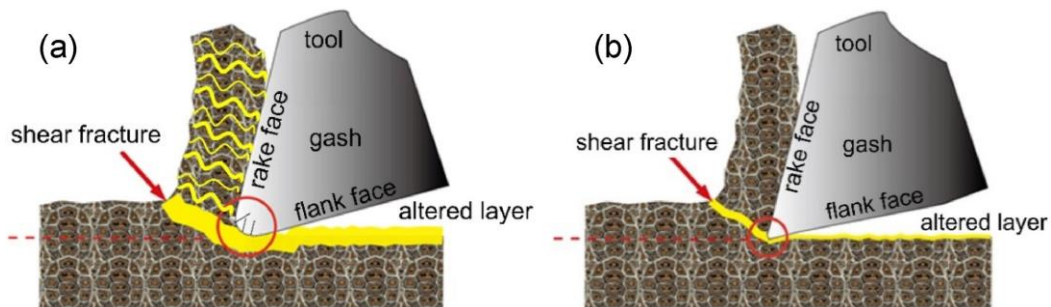


Рис. 4 – Різання комерційним інструментом (а) і інструментом з кромкою, заточеною по запропонованій у дослідженні [5] технології (б): (а) заготовка суттєво змінюється інструментом в процесі різання, (б) заготовка демонструє незначні зміни під час різання

При спостереженні у електронному мікроскопі різальні кромки комерційних інструментів мають істотні нерівності, а це збільшує площу контакту з заготовкою і опір різанню. Нерівність різальної кромки також впливає на підвищення температури під час різання, а поверхня заготовки піддається підвищеній деформації за рахунок незадовільної форми різальної кромки, що ще більше збільшує нерівність обробленої поверхні. Запропонований в роботі [5] спосіб заточки різальної кромки призваний зменшити площу контакту з заготовкою і опір різанню, а відтак зменшує механічну деформацію обробленої поверхні. Розроблений шліфувальний круг SPCMP діаметром 100 мм був виготовлений на фенольному зв'язуючому із застосуванням абразиву – зеленого карбіду кремнію (GC). Круг SPCMP був виготовлений таким чином, щоби уникнути при обробці твердого сплаву переходу фази WC в фазу W₂C, та спровокувати окислення фази WC і її видалення за допомогою GC. При різанні інструментами WC-Co з гострими різальними кромками, заточеними обробкою

SPCMP, опір різанню був низьким, а степінь зносу зменшилася. Крім того, швидкість різання інструментів WC-Co при різанні Ti-6Al-4V і Inconel 718 після заточки різальної кромки кругом SPCMP була приблизно в два рази вищою, аніж до SPCMP. Встановлено, що різання жароміцних сплавів інструментом WC-Co з гострою різальною кромкою приводить до структурних дефектів тільки поблизу поверхні, а кристалічна структура зберігається на певній глибині від поверхні [5]. Карбід вольфраму без зв'язуючого (B-WC) – твердий і крихкий керамічний матеріал, який в основному використовується для виготовлення точних прес-форм, але він незадовільно піддається точній та високоефективній полірувці. В статті [6] для вирішення цього застосований інструмент з напівжорсткою кришкою (SRB) радіусом 40 мм. Він складається з трьох шарів. Зовнішній і внутрішній шари є резиновими мембранами з твердістю за Шором 75 HA. Середній шар виконаний з листа нержавіючої сталі товщиною 0,3 мм, що дозволяє підвищити жорсткість інструмента і зберегти певну гнучкість. Зовнішня резинова плівка вкрита полірувальною подушечкою. Відзначається, що шорстка поверхня підкладок B-WC перетворилася на дзеркальну вже після 2,5 хвилин полірування. А шорсткість поверхні в *Sa* була зменшена з 104 нм в середньому до 3,7 нм. Крім того, глибокі сліди від шліфувального інструменту були ефективно видалені, залишивши лише нанометричні подряпини від полірувального абразиву.

Тепер розглянемо особливості алмазної обробки пластичних матеріалів. Великня пластичність м'яких металів ускладнює досягнення високої якості поверхні при надточній обробці. У статті [7] проводилися експерименти з надточної механічної обробки полікристалічного олова та досліджувалися фактори, включаючи радіус верхньої частини інструмента, параметри різання та властивості матеріалу, що впливають на шорсткість поверхні при однокривковому алмазному точінні (single-point diamond turning –SPDT). Монокристалічні алмазні інструменти з радіусами різальної кромки 0,023, 0,209 і 1,130 мм використовувалися для дослідження впливу радіуса кромки інструмента на шорсткість поверхні в SPDT. Швидкість подачі і глибина різання в досліджах були сталими. Створено модель прогнозування шорсткості поверхні олова при SPDT, яка враховує мінімальну недеформовану товщину стружки, бічний потік, анізотропію та крок межі зерен. Експерименти показують, що максимальна помилка передбачення цієї моделі прогнозування становить 6,51%. Середня арифметична висота R_a , розрахована за цією моделлю становить 1,13, 0,13 і 0,02 нм. Таким чином, шорсткість поверхні повинна зменшуватися зі збільшенням радіуса вершини інструмента за тих же параметрів обробки.

На закінчення цього огляду звернемо увагу на вплив геометрії алмазного зерна на особливості обробки. Для монокристалічної міді вивчений процес надшвидкісного наноскрайбування V-подібних канавок алмазами з різними передніми кутами [8]. Для нас тут є цікавим, як саме геометрія алмазу може вплинути на формування навалів (нерівної висоти канавки) в оброблюваному монокристалічному матеріалі. Було визначено, що на явище нерівної висоти з обох боків V-подібної канавки впливає передній кут алмазних зерен з вивченого діапазону: -20° , -10° , 0° , 10° та 20° . Встановлено, що шліфування з позитивним переднім кутом дозволяє отримати V-подібний поперечний переріз з однаковою висотою з обох боків (рис. 5). Разом з тим, наявність формування навалів на пластичному матеріалі буде впливати на показники шорсткості оброблюваної міді.

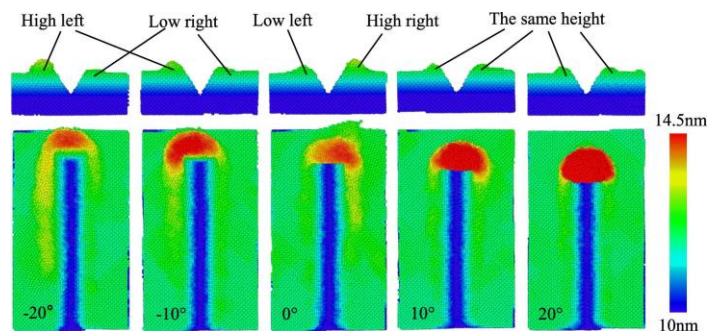


Рис. 5 – V-подібні канавки руху зерна при дослідженні надшвидкісного наноскрайбування монокристалічної міді алмазними зернами з різними передніми кутами [8]

Результати дослідження. Враховуючи мету нашого дослідження, нами були проаналізовані експериментальні дані шорсткості обробленої поверхні за параметром R_a при шліфуванні твердих сплавів.

При цьому нами встановлено, що шорсткість шліфованої поверхні твердих сплавів має певний кореляційний зв'язок з їхніми фізичними властивостями. Так, із зростанням густини та коерцитивної сили твердих сплавів шорсткість збільшується:

$$Ra = 1/(2,204+5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), \quad Ra = 0,208+1,068 \cdot 10^{-2} K_c.$$

Із підвищенням твердості, міцності під час згинання та величини зерен карбідної фази шорсткість зменшується:

$$Ra = 3,72-3,74 \cdot 10^{-2} H_{mc}, \quad Ra = 0,4004-1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, \quad Ra = 0,555-0,146 Z_{mc}.$$

Наведені залежності дозволяють у цілому прогнозувати напрямок зміни показника шорсткості поверхні, що шліфується, особливо у тих випадках, коли піддається обробці широка номенклатура сплавів в умовах дрібносерійного виробництва.

З наведеного вище нас більше зацікавила залежність шорсткості шліфованої поверхні від твердості твердих сплавів, оскільки це найбільш легко контрольований показник, у порівнянні із наведеними іншими, властивостями. Перевірку вказаної вище тенденції зменшення показника Ra із збільшенням твердості твердих сплавів зроблена нами на одному твердому сплаві ТТ21К9 при шліфуванні з охолодженням кругом 12А2-45° 150x10x3x32 – АС4МА 63/50–В1-11П-2–125 з продуктивністю 480 мм³/хв. Пластини твердого сплаву з діапазону твердостей 90,5–92,0 HRA були поділені на три групи за твердістю і була визначена для кожного діапазону шорсткість обробленої поверхні (табл. 1).

Таблиця – Показники шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні твердого сплаву ТТ21К9 різної твердості

| Діапазон твердостей, HRA | Показники шорсткості, мкм | | |
|-----------------------------|---------------------------|--------|-----------|
| | Ra | $Rmax$ | $Rmax/Ra$ |
| 90,5 – 90,9 | 0,28 | 1,81 | 6,5 |
| 91,0 – 91,4 | 0,23 | 1,67 | 7,3 |
| 91,5 – 92,0 | 0,20 | 1,51 | 7,6 |

Аналіз даних таблиці свідчить про те, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість зменшується. Тобто і на одному сплаві підтверджено, те що нами було виявлено для сукупності твердих сплавів. Тепер звернемо увагу на інший показник шорсткості – $Rmax$ та на поведінку відношення показників $Rmax/Ra$. Показник $Rmax$ – найбільша висота профілю, очікувано зменшується із зменшенням показника Ra , а ось поведінка величини відношення є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає. Це підтверджує висновки робіт [4–6], що на твердому сплаві при алмазній обробці виникають приховані подряпини і, як бачимо по зростанню показника відношення (див. табл.), чим сплав є твердішим, тим відношення є більшим.

Тепер розглянемо як змінюються показники шорсткості, коли у нас шліфуванню піддаються шаруваті пластини, у яких сполучається різальна кераміка ВОК71 та безвольфрамовий твердий сплав (БВТС) ТН20. Дослідженню піддавалася тришарова пластина марки ВОК85С з чергуванням шарів: кераміка–БВТС–кераміка при шліфуванні з продуктивністю 600 мм³/хв. Встановлено для двох випадків застосування алмазних кругів: із зернистістю алмазів АС4 100/80 шорсткість шарів за параметром Ra складала в мкм 0,19 – 0,18 – 0,22, а із зернистістю АС6 250/200 складала 0,90 – 0,75 – 0,89 мкм. Як бачимо в обох випадках шорсткість на шарі БВТС була дещо меншою, за шорсткість шарів на кераміці. Для порівняння розглядалося шліфування двошарової пластини ВОК95С, у якій сполучається два шари – різальна кераміка ВОК71 та БВТС, з продуктивністю 480 мм³/хв. та зернистістю алмазів АС4 125/100. Встановлено, що на кераміці показники шорсткості склали: Ra – 0,30 мкм, $Rmax$ – 2,48 мкм, а відношення $Rmax/Ra$ склало 8,3. На шарі БВТС показники шорсткості склали: Ra – 0,25 мкм, $Rmax$ – 1,71 мкм, а відношення $Rmax/Ra$ склало 6,8. Як бачимо і тут на більш твердій кераміці (93 HRA) фіксується і більше відношення $Rmax/Ra$, що свідчить про наявність на крихкій кераміці отих прихованих подряпин. А ось більша шорсткість на кераміці пояснюється отим механізмом утворення шорсткості на крихких матеріалах, який викладений вище у посиланні [3].

Насамкінець розглянемо обробку сталевих пластин, коли у нас є сполучення загартованої сталі 9ХФ (HRC 54–56) та м'якої незагартованої сталі 10 (твердість 74–75 HRB). Шліфування відбувалося кругом 12А2-45° 150x20x3x32 – КР 160/125 МО20-2 100 з охолодженням та продуктивністю 1100 мм³/хв. На відміну від обробки твердих та крихких матеріалів, наведених вище, тут на більш твердій сталі отримано менші показники шорсткості: Ra – 0,72 мкм, $Rmax$ – 3,42 мкм, а відношення $Rmax/Ra$ склало 4,8. На м'якій сталі 10 показники шорсткості, при руху зерен КНБ із загартованої сталі на незагартовану, склали: Ra – 0,85 мкм, $Rmax$ – 7,5 мкм, а відношення $Rmax/Ra$ склало 8,8. Як бачимо, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на негартовану, то дещо збільшується показник Ra , а ось показник $Rmax$ зростає суттєво. У значній мірі це викликано саме бічними ефектами (навалами), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу, що підкреслено у статтях [7, 8]. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей Sm залишається незмінним при переході руху зерен КНБ на загартованій частині, так і на незагартованій, і склав 136 мкм.

Висновки. Внаслідок наведеного вище, можливо зробити наступні висновки.

1. Аналіз літературних даних засвідчив, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки і, як наслідок, різні механізми утворення шорсткості обробленої поверхні. Крім того, сучасні закордонні дослідники приділяють належну увагу поліруванню твердих сплавів і якісній різальній кромці.

2. Показано, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість зменшується. Це підтверджено, як на одному сплаві, так і для сукупності твердих сплавів. Причому показник R_{max} очікувано зменшується із зменшенням показника R_a , а ось поведінка величини відношення показників R_{max}/R_a є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає.
3. Встановлено, що при шліфуванні шаруватих пластини, у яких сполучається різальна кераміка ВОК71 та безвольфрамовий твердий сплав (БВТС) ТН20, на кераміці фіксується більша шорсткість. Причому і тут на більш твердій кераміці (93 HRA) фіксується і більше відношення R_{max}/R_a , як і на більш твердих сплавах, що свідчить про наявність на цих крихких матеріалах формування більшої кількості прихованих подряпин.
4. Виявлено, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на незагартовану, то дещо збільшується показник R_a , а ось показник R_{max} зростає суттєво. У значній мірі це викликано саме бічними ефектами (навалестей), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей S_m залишається незмінним при переході руху зерен КНБ з загартованої частини на незагартовану.

Список літератури

1. Научные технологические школы в развитии современного производства: научно-информационное издание / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и В.А. Жовтобрюха. // Новиков Ф.В., Жовтобрюх В.А., Лавриненко В.И. и др. – Днепр : ЛИРА, 2021. – 436 с.
2. Mohsen Barmouz, Felix Steinhäuser, Bahman Azarhoushang, Jahangir Khosravi. Influence of bond thermal and mechanical properties on the additively manufactured grinding wheels performance: Mechanical, wear, surface integrity, and topography analysis. *Wear*. Volumes 538–539, 15 February 2024, 205215. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205215>
3. Wenbin Zheng, Li Ma, Shiyuan Pei, Ramin Aghababaei. Numerical assessment of transition in cutting mode and its effect on roughness creation. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 261, 1 January 2024, 108666. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108666>
4. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August 2023, Pages 6865–6879. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.112>
5. Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, September–October 2022, Pages 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.077>
6. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, May–June 2023, Pages 1597–1611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.090>
7. Zhifu Xue, Min Lai, Feifei Xu, Fengzhou Fang. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 324, March 2024, 118256. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118256>
8. Longzhou Dai, Genyu Chen, Zizhao Shan. Study on ultra-high speed nano-grinding of monocrystalline copper with V-shaped diamond abrasive grains based on molecular dynamics method. *Diamond and Related Materials*. Volume 111, January 2021, 108224. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108224>

References (transliterated)

1. Scientific technological schools in the development of modern production: scientific and information publication / Under the total. ed. F.V. Novikova and V.A. Szovtobruha / Novikov F.V., Szovtobruh V.A., Lavrinenko V.I. et al. – Dnepr : LIRA, 2021. – 436 p.
2. Mohsen Barmouz, Felix Steinhäuser, Bahman Azarhoushang, Jahangir Khosravi. Influence of bond thermal and mechanical properties on the additively manufactured grinding wheels performance: Mechanical, wear, surface integrity, and topography analysis. *Wear*. Volumes 538–539, 205215. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205215>
3. Wenbin Zheng, Li Ma, Shiyuan Pei, Ramin Aghababaei. Numerical assessment of transition in cutting mode and its effect on roughness creation. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 261, 108666. (2024) <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108666>
4. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, Pages 6865–6879. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.112>
5. Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, Pages 606–615. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.077>
6. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, Pages 1597–1611. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.090>
7. Zhifu Xue, Min Lai, Feifei Xu, Fengzhou Fang. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 324, 118256. (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118256>
8. Longzhou Dai, Genyu Chen, Zizhao Shan. Study on ultra-high speed nano-grinding of monocrystalline copper with V-shaped diamond abrasive grains based on molecular dynamics method. *Diamond and Related Materials*. Volume 111, 108224. (2021) <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108224>

Надійшла (received) 07.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Лаврінченко Валерій Іванович (Lavrinenko Valerii) – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу «Алмазно-абразивної та фізико-технічної обробки» Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, тел.: + 380 67 727 24 73, e-mail: lavrinen52@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2098-7992.

Солод Володимир Юрійович (Solod Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, перший проректор Дніпровського державного технічного університету МОН України, м. Кам'янське, Україна; тел. + 380 68 217 23 99, e-mail: v_solod@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7516-9535.

Тищенко Володимир Андрійович (Tyshchenko Volodymyr) аспірант Дніпровського державного технічного університету МОН України, м. Кам'янське, Україна, e-mail: v.a.tishchenko@gmail.com ORCID: 0009-0001-6473-5909.

П. Р. ТРИШИН, Ю. М. ВНУКОВ, О. Б. КОЗЛОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

Вібрації під час точіння суттєво впливають на якість обробленої поверхні, знижують точність обробки, прискорюють зношування інструментів та обладнання, а також підвищують витрати на механічну обробку. Крім того, вони створюють несприятливі умови праці для робітників. Різноманітність методів обробки, таких як лезове та абразивне різання, з постійним або змінним перерізом зрізу, а також з переривчастим чи безперервним різанням, ускладнює створення єдиної теорії автоколивань для процесу різання. Це також ускладнює розробку універсальних методів гасіння автоколивань, зокрема при точінні. Однак сучасні дослідження, що використовують інноваційні конструкції коливальних систем на основі різців-осциляторів, дозволяють глибше зрозуміти складну координатно зв'язану природу автоколивань у процесі різання через спрощені моделі таких систем. У дослідженні автоколивної системи при точінні жорсткої деталі вважається, що верстат є абсолютно жорстким. Різець, маючи меншу жорсткість, виступає як осцилятор, що коливається в межах системи. Зона різання, що включає стружкоутворення та тертя, діє як регулятор, створюючи взаємний силовий зв'язок з різцем. Зворотний зв'язок між різцем і зоною різання визначає особливості коливань. У дослідженні розглядаються різні типи коливальних систем із одним і двома ступенями свободи, що дозволяє вивчати регенеративні та «чисті» коливання. Розробка таких систем дозволяє більш детально вивчати механізми збудження автоколивань та їхній вплив на процес точіння.

Ключові слова: автоколивання, різець-осцилятор, коливальна система, точіння

P. R. TRISHIN, Yu. M. VNUKOV, O. B. KOZLOVA INVESTIGATION OF THE SELF-OSCILLATING SYSTEM OF THE CUTTING PROCESS DURING TURNING

Vibrations during turning significantly affect the quality of the machined surface, reduce machining accuracy, accelerate wear of tools and equipment, and increase machining costs. In addition, they create unfavorable working conditions for workers. The variety of machining methods, such as blade and abrasive cutting, with a constant or variable cutting cross-section, as well as with intermittent or continuous cutting, makes it difficult to create a single theory of self-oscillations for the cutting process. This also makes it difficult to develop universal methods for damping self-oscillations, in particular in turning. However, modern research using innovative designs of oscillatory cutting systems allows us to better understand the complex coordinate-related nature of self-oscillations in the cutting process through simplified models of such systems. In the study of a self-oscillating system during turning of a rigid part, it is assumed that the machine tool is absolutely rigid. The cutter, having lower rigidity, acts as an oscillator that oscillates within the system. The cutting zone, which includes chip formation and friction, acts as a regulator, creating a mutual force connection with the cutter. The feedback between the cutter and the cutting zone determines the characteristics of the oscillations. The study considers different types of oscillatory systems with one and two degrees of freedom, which allows studying regenerative and "pure" oscillations. The development of such systems allows studying in more detail the mechanisms of excitation of self-oscillations and their influence on the turning process.

Keywords: self-oscillations, cutter-oscillator, oscillatory system, turning

1. Вступ. Вібрації під час точіння негативно впливають на якість обробленої поверхні, призводять до підвищеного зношування інструменту та обладнання, обмежують можливості скорочення часу обробки, збільшують вартість механічної обробки та створюють несприятливі умови праці для робітників [1].

Вивчення вібрацій у процесі різання триває вже понад 100 років, починаючи з фундаментальних досліджень Ф. Тейлора [2]. Автоколивання (АК) при різанні є одним із найбільш небезпечних і важко прогнозованих видів вібрацій. Вони виникають в результаті складної взаємодії коливальної системи верстата, інструменту і заготовки, при цьому критичну роль відіграють процеси, що самозбуджуються, пов'язані з координатними зв'язками і регенеративними ефектами [3].

У 1950-1960-х роках, на основі експериментальних досліджень, були розроблені теорії [4, 5, 6], які пояснюють причини виникнення АК при різанні. Також були запропоновані аналітичні методи прогнозування та вибору режимів безвібраційної обробки. У наступні десятиліття основна увага дослідників була зосереджена на розробці методів боротьби з АК для забезпечення вібростійкості верстатів [7, 8].

Однак різноманітність методів обробки – лезової та абразивної, з постійним або змінним перерізом зрізу, при безперервному або переривчастому різанні – ставить під сумнів можливість створення єдиної загальної теорії АК для процесу різання. Це ускладнює розробку універсальних практичних рекомендацій щодо гасіння АК, зокрема при точінні.

Сучасні експериментальні дослідження [9, 10], які використовують оригінальні конструкції коливальних систем на основі різців-осциляторів з одним та двома ступенями свободи коливання ріжучої кромки дозволили розширити знання про складну, координатно зв'язану автоколивальну систему процесу різання через її спрощену модель.

Метою даної роботи було дослідження автоколивної системи процесу різання при точінні, розширення знань про механізми виникнення АК при точінні з урахуванням сучасних експериментальних досліджень.

2. Аналіз досліджень та публікацій. Автоколивальні процеси самозбуджуваного характеру спостерігаються у різних коливальних системах – механічних, електричних, біологічних та інших. Встановлено, що різноманіття умов виникнення АК може бути описане загальною схемою автоколивної системи (рис. 1).

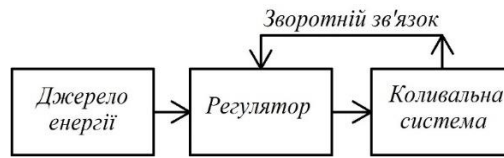


Рис. 1 – Автоколивальна система [11]

Механізм самозбудження полягає у тому, що енергія, яку система отримує від зовнішнього джерела E_+ дорівнює енергії, яку коливальна система втрачає E_- (рис. 2). У цьому випадку амплітуда коливань A стає сталою [11].

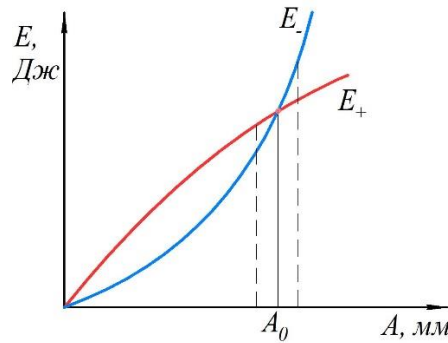


Рис. 2 – Діаграма стійкості коливальної системи [11]

Автоколивальна система – це система (пристрій), яка здатна генерувати коливання шляхом перетворення постійного руху в коливальний. Така система включає джерело постійної енергії, коливальну систему, регулятор (клапан), що пропускає енергію порціями від джерела до коливальної системи, а також зворотний зв'язок, за допомогою якого коливальна система керує роботою регулятора [11].

Фундаментальні дослідження автоколивальних процесів при різанні почалися у 1940-1960-х роках [12, 13]. Однак на той час знання про механіку різання ще тільки формувалися та систематизувалися [14, 15]. Було встановлено, що основними джерелами самозбудження коливань при різанні є координатний зв'язок та регенеративний ефект (різання по хвилястому сліду) [16].

Координатний зв'язок [17, 18] збуджує коливання між інструментом та заготовкою одночасно щонайменше у двох напрямках (рис. 3). Модель такої коливальної системи при різанні включає різець масою m , підвішений на двох пружних елементах із жорсткостями K_1 та K_2 . Одночасні коливання у напрямках X_1 та X_2 відбуваються зі зсувом фаз. У результаті траєкторія руху різальної кромки різця від точки А до точки В і назад (рис. 3) наближається до еліпса. Протягом першої половини періоду руху інструмента (від А до В) пружна реакція пружин R перевищує силу різання F . У цей момент енергія вилучається з коливальної системи. Під час зворотного руху (від В до А) сила різання F перевищує пружну реакцію R , і енергія надходить до коливальної системи [16]. Оскільки надходження енергії перевищує втрати, утворюється надлишок енергії, що підтримує стійкість коливань, незважаючи на втрати на демпфування. Але координатний зв'язок діє не завжди, якщо сила пружної системи буде вища ніж сила різання, наприклад при високій жорсткості державки різця, то АК збуджуватися не будуть. Механізм збудження АК пов'язаний з координатним зв'язком відсутній у розрахунку прогнозованих пелюсткових границь діаграми стійкості (SLD – Stability Lobes Diagram) [17].

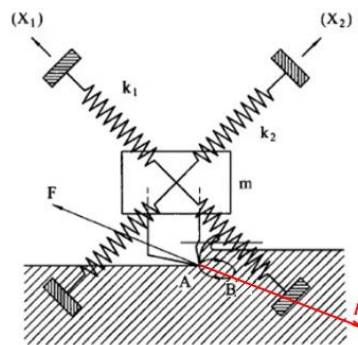


Рис. 3 – Механізм координатного зв'язку в системі з двома взаємно перпендикулярними ступенями свободи [16, 17]

Регенеративний ефект збудження АК при точінні виникає під час руху різальної кромки по хвилястий поверхні обробки, сформованій під час попереднього оберту заготовки [19, 20]. В наслідок чого, починаючи з

другого оберту, відбуваються коливання ріжучої кромки відносно товщини зрізу (вздовж осі Y) (рис. 4) [16], товщина зрізу стає змінною. Коливання товщини зрізу спричиняють коливання сили різання з частотою, наближеною до власної частоти коливань різця. Тому АК відбуваються в умовах, близьких до резонансних. Між хвилями на сусідніх поверхнях різання виникає фазовий зсув, величина якого є самоналаштовуваною характеристикою [9]. Регенеративний ефект є головним джерелом, до 80...85% внеску дії всіх джерел коливань, але він не є первинним джерелом збудження АК, оскільки він починає діяти лише з другого оберту деталі.

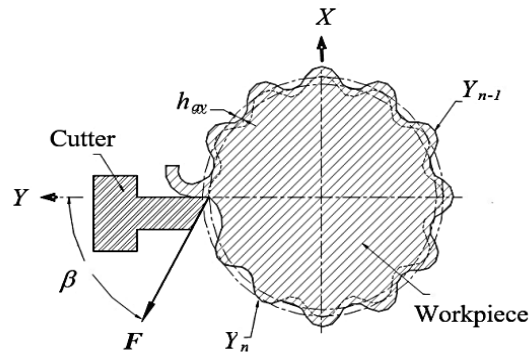


Рис. 4 – Регенерація хвилястості поверхні при точінні [1, 16]

При різанні два вище згаданих джерела коливань можуть також працювати разом (рис. 5). Джерелом постійної енергії (руху) при цьому є швидкість різання v , коливальною системою є різець з масою m , зворотній зв'язок M , за визначенням J. Tlusty, встановлюється між деталлю і інструментом (осцилятором) [16]. Аналізуючи рис. 5 можна зробити висновок, що зона різання є замикаючою ланкою між деталлю та інструментом в автоколивальній системі процесу різання. Але в своїй роботі J. Tlusty [16] не визначає, що є саме регулятором в автоколивальній системі згідно загальноприйнятою схемою автоколивальної системи.

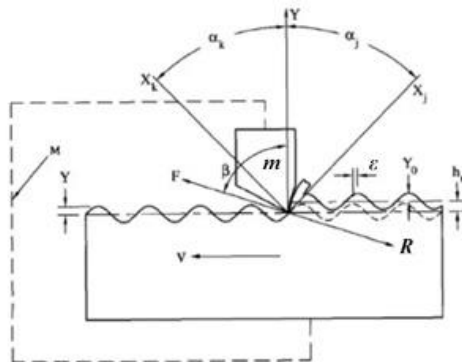


Рис. 5 – Модель автоколивальної системи різання [16]

Найважливішим аспектом експериментального дослідження автоколивальної системи при різанні є визначення впливу змін властивостей коливальної системи на реакцію регулятора, який встановлює кінцевий рівень стійких АК. Тому першочерговим завданням дослідження було чітко визначення джерела постійної енергії, регулятора, коливальної системи та зворотного зв'язку автоколивальної системи процесу різання при точінні. Наступним етапом було розробка конструкцій різців, які слугуватимуть осциляторами в коливальній системі та дозволять змінювати її властивості.

3. Опис автоколивальної системи процесу різання при точінні. Згідно проведеного аналізу сучасних експериментальних досліджень динаміки процесу різання була сформульована схема (рис. 6) автоколивальної системи при повздовжньому точінні жорсткої деталі 4, верстат вважається абсолютно жорстким, на якій показані основні ланки. Джерелом постійної енергії є електродвигун 1 обертання деталі та подачі інструменту 2. Одночасна робота цих двигунів забезпечує можливість реалізації процесу різання із постійними режимами обробки: швидкість різання, швидкість подачі різця. Консольно закріплений різець 6 має суттєво меншу жорсткість в порівнянні з деталлю, він має можливість коливання, тому він виступає в ролі коливальної системи (осцилятора) та його прийнято називати різець-осцилятор. На різці-осциляторі 6 встановлена ріжуча пластина 8, сам різець-осцилятор 6 закріплений у супорті 5.

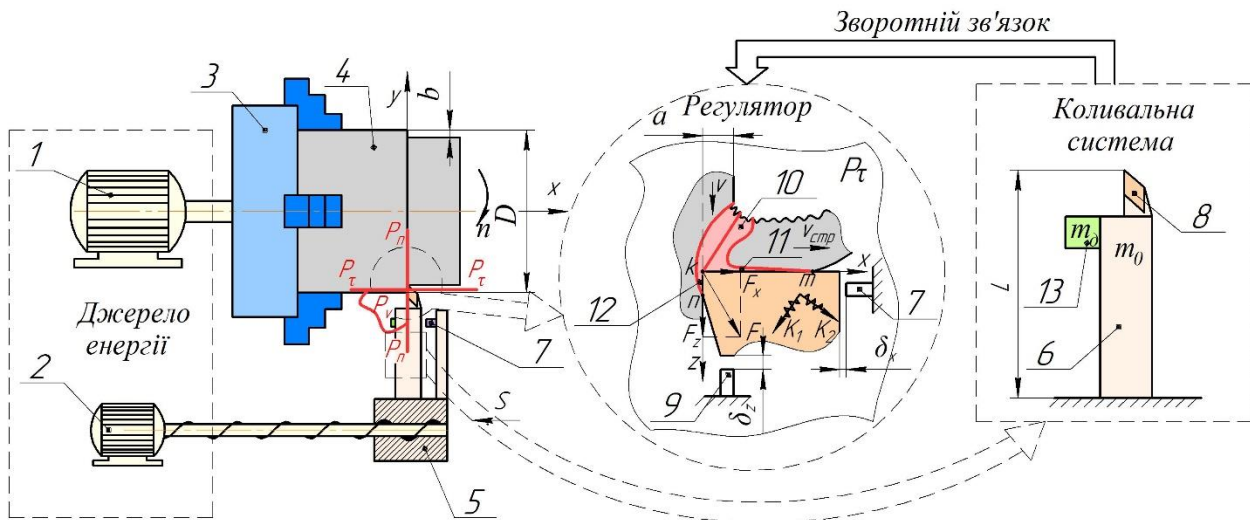


Рис. 6 – Схема автоколебательної системи процесу різання при поздовжньому точінні

Регулятором є зона різання (рис. 6), що включає зону стружкоутворення 10, майданчик контактного тертя стружки з передньою поверхнею різця km 11 та майданчик контактного тертя на задній поверхні різця з поверхнею різання на оброблюваній деталі kn 12. Державка різця-осцилятора має жорсткості K_1 та K_2 в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Зону різання розглядають у головній січній площині P_T , яка перпендикулярна лінії ріжучої кромки. У цій площині розташовуються вектори швидкості різання v і швидкості подачі S , якщо вона збігається з координатною площиною XOZ верстата.

Величина і напрямок зміщення ріжучої кромки в зрізаному шарі товщиною a , під дією сили різання F , залежить від напрямку головних осей і величини жорсткості K_1 і K_2 перерізу державки, довжини L вильоту та маси $m = m_0 + m_*$ різця.

Під час різання коливальна система (лезо різця-осцилятора) знаходиться в зачепленні з регулятором (зоною різання) по контактних поверхнях тертя, утворюючи взаємний силовий зв'язок. Зворотним зв'язком – це вплив коливальної системи (різця-осцилятора) на зону різання, яка є регулятором.

4. Аналіз основних властивостей автоколебательної системи при точінні. Сучасні уявлення про вібрацію автоколебальних систем підтверджують думку про складність цього явища. Згідно аналізу властивостей механічних автоколебальних систем, сформульовано основні властивості автоколебальної системи при точінні:

1) По виду відхилення осцилятора АК можуть бути майже гармонійні або релаксаційні [11]. В умовах різання розглядають майже гармонійні АК [4].

2) Незалежність АК від початкових умов збудження осцилятора [21].

3) Стійкість АК від випадкових від збуджень. Стійкість характеризується граничним циклом на фазовій площині (x, \dot{x}) [21].

4) Нелінійність енергії, що підводиться і відводиться до осцилятора за один коливальний цикл. Дозволяє забезпечувати стійке значення амплітуди АК за умови дотримання їхнього балансу. Причому нелінійними властивостями можуть мати будь-які ланки АК системи [11].

5) При АК спостерігається запізнення сил в пружному, демпфуючому та автоколебальних механізмах [8, 11]. Величину запізнення при порівнянні двох коливальних процесів оцінюють величиною фази.

6) При АК розвиваються сили змішаного характеру $F(x, \dot{x})$, які не розкладаються на суму сил $F(x) + F(\dot{x})$ [21].

7) У реальних процесах можуть одночасно спостерігаються змішані види коливань, наприклад вимушені, параметричні та АК [22].

Перелічені властивості АК систем становлять значні труднощі під час вирішення нелінійних диференціальних рівнянь руху із запізненням визначення закону руху осцилятора. У цьому випадку найзручнішим джерелом інформації про особливості поведінки АК системи в умовах різання є експериментальна осцилограма (закон) руху різців-осциляторів різних конструкцій.

5. Аналіз впливу режимів різання на збудження АК під час точіння. Багато науковців [23, 24] вважають, що найбільш значущим параметром режиму різання, який безпосередньо впливає на збудження вібрацій, є глибина різання t , яку зручно розглядати як ширину перерізу зрізаного шару b . Це пояснюється тим, що збільшення параметра b прямо пропорційно збільшує силу різання F (рис. 7, а). В більшості досліджень вібраційну стійкість верстата [4, 7] оцінювали за значенням граничної ширини зрізу b_{lim} , при якій починають збуджуватися недопустимі рівні вібрацій верстата $A_{AK}^{доп}$. Застосування критерію b_{lim} дозволило простим

способом проводити порівняльну оцінку вібраційної стійкості різних верстатів та удосконалювати їх конструкцію. Однак з точки зору вивчення динаміки процесу різання, де зона різання виконує роль регулятора в автоколивальній системі, який впливає на процес збудження АК, ширина зрізу b є малозначущим параметром. Це пов'язано з тим, що пружно-деформаційні процеси стружкоутворення в механіці різання розглядаються як плоска задача у головній січній площині P_r . Іншими словами, у кожній точці по довжині різальної кромки fk (рис. 6) процес стружкоутворення залишається незмінним. Експериментально це підтверджується тим, що усадка стружки, яка визначає рівень деформації при різанні, не залежить від зміни ширини зрізу b [25].

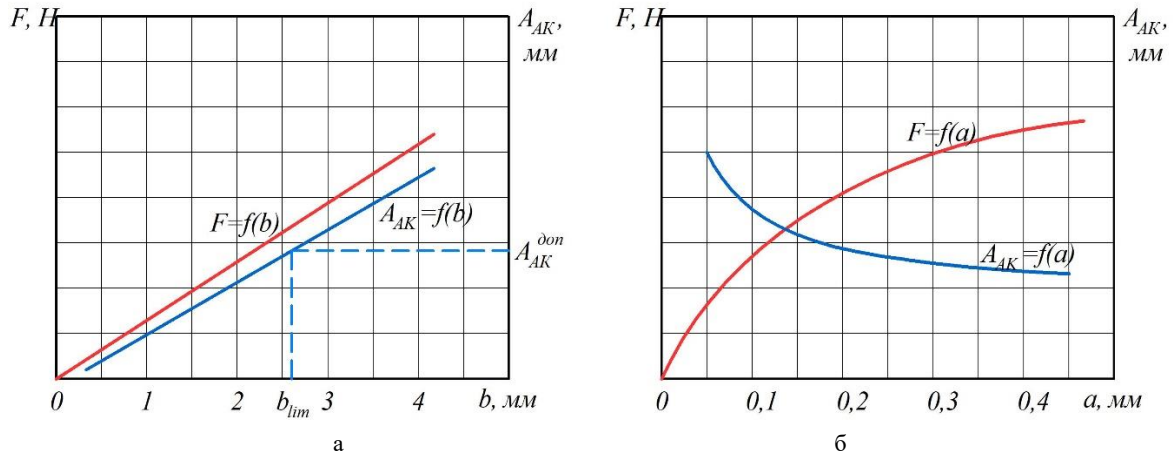


Рис. 7. Вплив ширини (а) та товщини (б) зрізу на силу різання F та амплітуду A_{AK} [25]

Таким чином, застосування параметра b_{lim} під час розробки SLD у 1960-х роках [5, 6] не враховувало особливості формування зони різання за різних умов обробки та зводилося лише до визначення b_{lim} від частоти обертання деталі при точінні або від зубцевої частоти при фрезеруванні при яких процес різання був вібростійким. Попри це, сьогодні метод SLD залишається базовим інструментом для аналітичного прогнозування безвібраційних умов різання для найрізноманітніших видів обробки у частотному діапазоні [26].

Згідно аналізу проведених досліджень [25, 27] зміна подачі S (товщини зрізу a), показує відсутність пропорційного зв'язку між силою різання F та інтенсивністю АК (амплітудою) (рис. 7, б)

Таку ж саму залежність в багатьох дослідженнях [10, 25] показує швидкість різання v , а також ширина площадки зношення h_3 на задній поверхні різця – відсутність пропорційного зв'язку між силою різання F та інтенсивністю АК (рис. 8 а, б).

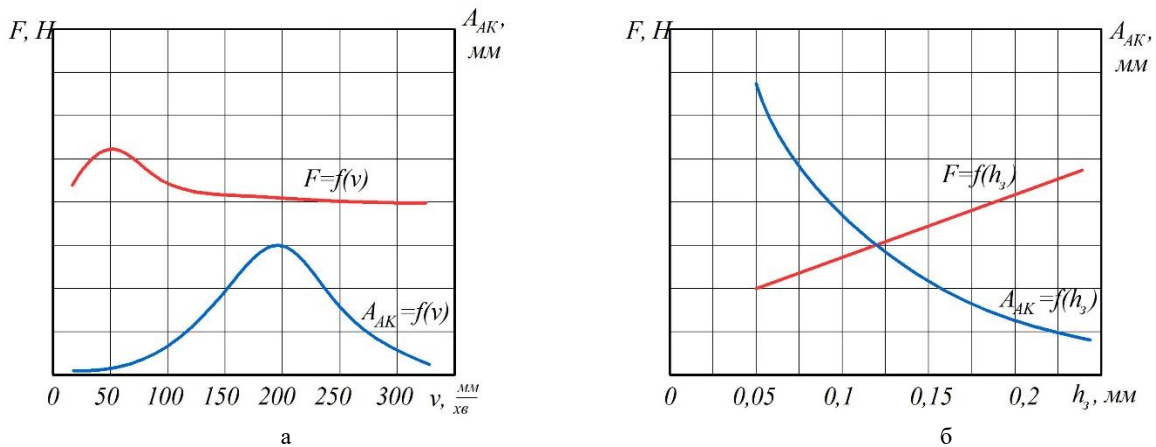


Рис. 8. Вплив швидкості різання (а) та площадки зношення на задній поверхні різця (б) на силу різання F та амплітуду A_{AK} [10, 25]

6. Конструкція різців-осциляторів. Як зазначалося раніше різець-осцилятор в автоколивальній системі при точінні жорсткої деталі є коливальною системою. При цьому кількість ступенів свободи яку він має визначає кількість джерел автоколивань які діють на нього. Також кількість ступенів свободи визначає характер траєкторії руху різальної кромки різця-осцилятора під час його коливань у зрізаному шарі оброблюваного матеріалу. Якщо різець-осцилятор є призматичним стрижнем (рис. 6) довжиною L , жорстко закріпленим у різцетримачі, то залежно від розташування різальної кромки та співвідношення розмірів перерізу державки h/b

(рис. 9), він може мати різну кількість ступенів свободи. Основні схеми різців-осциляторів із різними ступенями свободи за умови, що напрям дії сили (НДС) різання F знаходиться під кутом α до осі z наведено на рис. 9.

Різальна кромка звичайного прохідного різця (рис. 9, а) з головним кутом в плані 90° має три ступені свободи під дією сили F : відхилення вздовж вісей x, y, z від дії сили F_z , горизонтальне відхилення вздовж осі x від сили F_x , а також поворот проти годинникової стрілки під дією моменту $M=F \cdot r$, що виникає під час кручення стрижня різця. При одночасних коливальних рухах різальна кромка описує складну просторову траєкторію.

В свою чергу, конструкція різця-осцилятора передбачає встановлення ріжучої пластинки з головним кутом в плані 90° , переднім кутом 0° , кутом нахилу ріжучої кромки 0° , ріжуча кромка розміщена на вісі жорсткості державки різця-осцилятора (рис. 6). Це, по-перше, забезпечує відсутність радіальної складової сили різання, крутильних коливань, різець-осцилятор має два ступеня свободи і вигинається в площині XOZ (рис. 9, б). Траєкторія руху різальної кромки в цьому випадку наближається до еліпса. По-друге, цим забезпечується співпадіння координатних площини верстату (XOZ, YOZ, XOY), в які здійснюється обертання деталі та переміщення інструмента, з координатними площинами при різанні – P_v, P_n, P_r . Жорсткість різця-осцилятора змінюється шляхом зміни вильоту, а його інерційність – шляхом прикладання до маси різця-осцилятора додаткової маси m_0 (рис. 6). Для вимірювання переміщень δ_x, δ_z відносно вісей x та z ріжучої кромки різця-осцилятора 6 використовуються два індуктивні датчики 7, 9 (рис. 6).

Співвідношення розмірів поперечного перерізу різця-осцилятора h/b може суттєво змінити відношення жорсткостей стрижня $K_1/K_2=h^2/b^2$ при його «косому» вигині вздовж осей z та x . Таким чином можна створити конструкцію різця-осцилятора з однією ступенню свободи (рис. 9, в), яка забезпечить траєкторію руху різальної кромки або тільки вздовж осі x , або тільки вздовж осі z у вигляді прямої лінії.

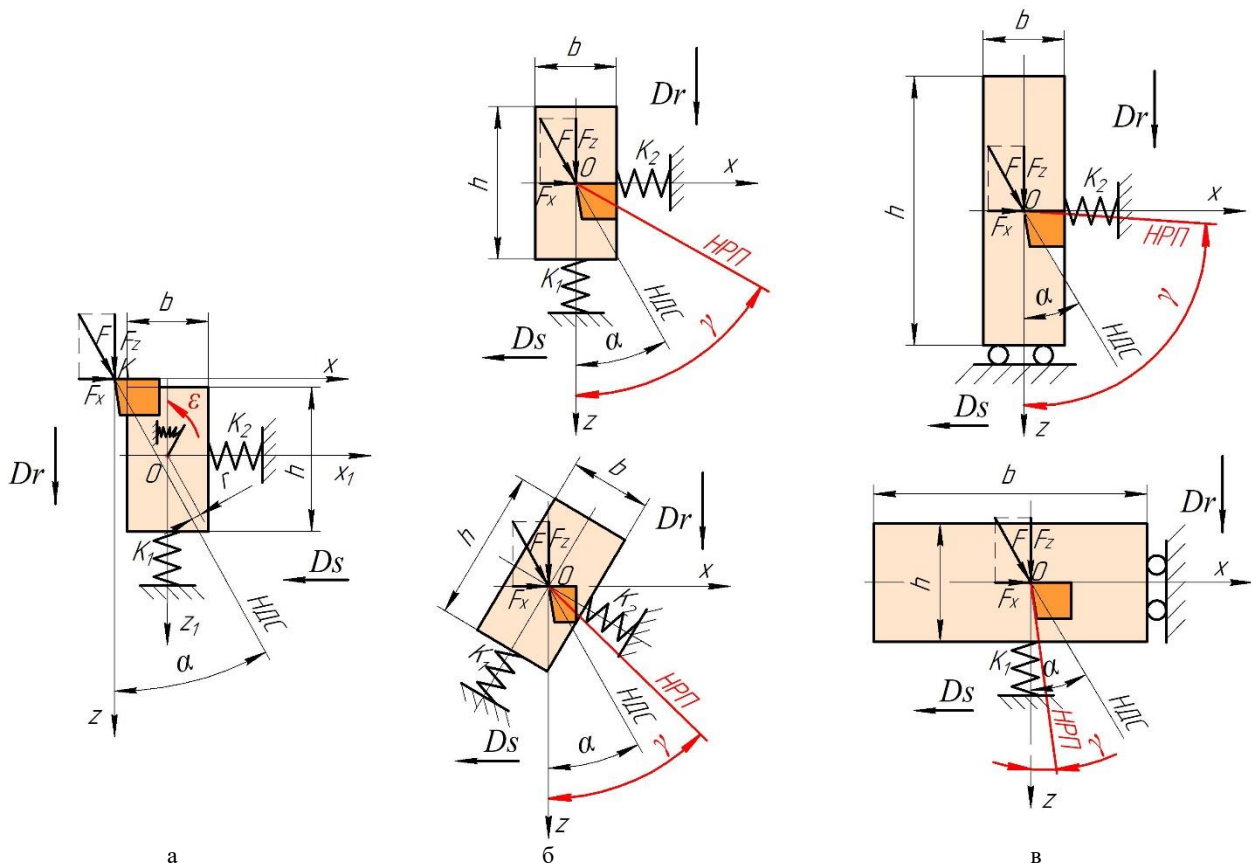


Рис. 9 – Різці-осцилятори з різними ступенями свободи: а – 3 ступеня свободи (по осі X та Z та поворот на кут ϵ); б – 2 ступені свободи; в – 1 ступінь свободи (тільки по осі x або тільки осі z).

Напрямок результуючого переміщення (НПП) ріжучої кромки під дією сили F при «косому» вигині розраховують за формулою [28]:

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\tan\alpha\left(\frac{h}{b}\right)^2\right). \quad (1)$$

Результати розрахунків НПП за формулою (1) для різних співвідношень розмірів перерізу різця-осцилятора наведено у таблиці 1 та показані на рис. 9.

Таблиця 1

| | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-----|------|------|-------|------|-------|
| $\frac{h}{b}$ | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,33 | 0,25 | 0,2 | 0,1 |
| $\frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{h}{b}\right)^2$ | 64 | 16 | 4 | 1 | 0,25 | 0,11 | 0,063 | 0,04 | 0,01 |
| γ , deg | 88,4° | 83,8° | 66,6° | 30° | 8,2° | 3,6° | 2,1° | 1,3° | 0,33° |

Для співвідношення $h/b=8$ кут $\gamma = 88,4^\circ$ при цьому НРП ріжучої кромки практично збігається з віссю x , відхиляючись на $1,6^\circ$. Для $h/b=0,2$ кут $\gamma = 1,3^\circ$, а НРП ріжучої кромки практично збігається з віссю z , відхиляючись на $1,3^\circ$. Для $h/b=1$, кут $\gamma = \alpha$, НРП ріжучої кромки збігається з НДС. У цьому випадку, якщо в перерізі державки різця-осцилятора буде круг, то його жорсткість у будь-якому напрямку при косому згині буде незмінною.

Таким чином, шляхом зміни тільки співвідношення розмірів перерізу державки різця-осцилятора h/b можна отримати умови колювання ріжучої кромки або по осі x або тільки осі z тобто створити різні колювальні системи з одним ступенем свободи. У цих випадках виключають вплив координатного зв'язку.

Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі x дозволяє вивчати вплив колювань лише товщини зрізу на збудження вібрації (регенеративний ефект) [28]. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі z , дозволяє вивчати вплив колювань миттєвої (реальної) швидкості різання. Він виключає відхилення ріжучої кромки по осі x , усуваючи цим появу хвилі на поверхні різання та вплив умови різання «по вібраційному сліду», без колювання реальної товщини зрізу. Траєкторія руху ріжучої кромки різця-осцилятора, який має два ступені свободи по осі x і z , має форму близьку до еліпсу. Якщо різець-осцилятор має круглий переріз державки він має постійну жорсткість в будь-якому напрямку дії сили різання. Це дозволяє вивчати таким різцем-осцилятором вплив пов'язаних колювань по осях x та z на інтенсивність вібрації.

Висновки. Згідно проведеного дослідження автоколювальної системи процесу різання при точінні жорсткої деталі, верстат вважається абсолютно жорстким, встановлено, що джерелом постійної енергії є електродвигун обертання деталі та подачі інструменту. Різець в цьому випадку має суттєво меншу жорсткість в порівнянні з деталлю, він має можливість колювання, тому він виступає в ролі колювальної системи (осцилятора) та його прийнято називати різцем-осцилятором. Регулятором є зона різання, що включає зону стружкоутворення, майданчик контактної тертя стружки з передньою поверхнею різця та майданчик контактної тертя на задній поверхні різця з поверхнею різання на оброблюваній деталі. Під час різання колювальна система (лезо різця-осцилятора) знаходиться в зачепленні з регулятором (зоною різання) по контактних поверхнях тертя, утворюючи взаємний силовий зв'язок. Зворотним зв'язком – це вплив колювальної системи (різця-осцилятора) на зону різання, яка є регулятором.

Розробка колювальних систем (різців-осциляторів) з одним ступенем свободи дозволяє виключити вплив координатного зв'язку і в реальних умовах різання спостерігати різні механізми збудження автоколювань. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі x , дозволяє вивчати особливості автоколювань при різанні тільки «по вібраційному сліду» відомі як регенеративні колювання. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі z , дозволяє вивчати особливості збудження автоколювань при різанні лише «по чистому», без впливу регенеративних колювань. Різець-осцилятор має два ступені свободи та однакову жорсткість у будь-якому напрямку колювального руху дозволяє вивчати пов'язані колювання без координатної залежності напрямку осей жорсткості осцилятора щодо координатної системи різання XOZ.

Список літератури:

1. Özer A. Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller / A. Özer, A. Sekiguchi // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – 56(2). – P. 11111-11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Taylor F.W. On the art of cutting metals / Frederick Winslow Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248p.
3. Mao S. H. On the existence of mode-coupling chatter in robotic milling based on chatter type indicators extracted by dynamic mode decomposition / S. H. Mao, S. T. Ye, Y. R. Jiang, C. Q. Shen, X. J. Zhang, S. J. Yan, H. Ding // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2024. – 220, – P. 111591. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111591>
4. Тлустый М. Автоколебания в металлорежущих станках : пер. с чешск. / М. Тлустый. – М. : Машгиз, 1956. – 395 с.
5. Tobias S.A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S.A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 p
6. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H.E. Merritt // Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87. – P. 447-454 <https://doi.org/10.1115/1.3670861>
7. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с
8. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков / М.Е. Эльясберг. –П : Издание ОКБС, 1993. – 180 с.
9. Tryshyn P. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting / P. Tryshyn, Y. Vnukov, O.Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 342-357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31
10. Vnukov Y. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 358-372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32
11. Харкевич А. А. Автоколебания. 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 176 с.

12. Tobias S. A. The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions / S.A. Tobias, W.A. Fishwick // *Trans. of ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1079–1088.
13. Arnold R.N. The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel / R.N. Arnold // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – London, 1946. – Vol. 154. – P.261–276
14. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н.Зорев. – М. : Mashgiz, 1956. – 368 с.
15. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А.П. Соколовский // *Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов: сб. научн. тр.* -М.: Mashgiz, 1958.– С.3–23.
16. Tlusty G., *Manufacturing Equipment and Processes*. – NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000. – 928p.
17. Celikag H. Can mode coupling chatter happen in milling? / H. Celikag, E. Ozturk, N. D. Sims // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. – P. 103738. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103738>
18. Yuan L. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber / L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, W. Li, // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – 117, P. 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.051>
19. Mohammadi Y. Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning / Y. Mohammadi, K. Ahmadi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2022. – 537. – P. 117158. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
20. Wang A. Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity / A. Wang, B. Zhou, W. Jin // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2024. – 166. – P. 104851.
21. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара Л. : *Машиностроение* 1976, 320 с.
22. Алифов А. А. Смешанные вынужденные, параметрические и автоколебания при неидеальном источнике энергии и запаздывающих силах // *Известия вузов. ПНД*. 2021. Т. 29, вып. 5. С. 739-750. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-739-750
22. Nam S. Analytical prediction of chatter stability for modulated turning / S. Nam, B. Eren, T. Hayasaka, B.S encer, E. Shamoto // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. P. 103739. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103739>
23. Ahmadi K. Bayesian updating of modal parameters for modeling chatter in turning / K. Ahmadi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2022. – 38. P. 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.006>
24. Основы теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. ; за заг. ред. М. П. Мазура. – 4-те вид., переробл. і допов. – Львів : Новий Світ-2000, 2022. – 471 с. – ISBN 978-966-418-105-82.
25. Itintas Y. Chatter Stability of Machining Operations / Itintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., Kilic, J. Z. M. // *Manuf. Sci. Eng.* – 2020. – 142(11). – P. 110801 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4047391>
26. Кучма, Л.К. Вибрации при работе на фрезерных станках и методы их гашения/ Л.К. Кучма. – М.: СССР, 1959. – 122с.
27. Vnukov Y. Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // *Strojnický časopis-Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – 74(1). – P. 169-180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>.

References (transliterated)

1. Özer A. Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller / A. Özer, A. Sekiguchi // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – 56(2). – P. 11111-11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Taylor F.W. On the art of cutting metals / Frederick Winslow Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248 p.
3. Mao S. H. On the existence of mode-coupling chatter in robotic milling based on chatter type indicators extracted by dynamic mode decomposition / S. H. Mao, S. T. Ye, Y. R. Jiang, C. Q. Shen, X. J. Zhang, S. J., Yan, H. Ding // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2024. – 220, – P. 111591. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111591>
4. Tlusty M. Self-oscillations in metal-cutting machines: trans. from the Czech Republic / M. Fat - M. : Mashgiz, 1956. – 395 p.
5. Tobias S.A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S.A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 p
6. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H.E. Merritt // *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*. – 1965. – Vol. 87. – P. 447–454. <https://doi.org/10.1115/1.3670861>
7. Kudynov V.A. Dynamics of machine tools / V.A. Kudynov. - M.: Mechanical engineering, 1967. – 360 p
8. Elyasberg M.E. Auto-oscillations of metal-cutting machines / M.E. Elyasberg. -P: OKBS edition, 1993. – 180 p.
9. Tryshyn P. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting / P. Tryshyn, Y. Vnukov, O.Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 342-357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31
10. Vnukov Y. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 358-372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32
11. Kharkevich A. AND. Self-oscillations. 2nd ed. - M.: Book house "LYBROKOM", 2009. - 176 p.
12. Tobias S. A. The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions / S.A. Tobias, W.A. Fishwick // *Trans. of ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1079–1088.
13. Arnold R.N. The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel / R.N. Arnold // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – London, 1946. – Vol. 154. – P.261–276
14. Zorev N.N. Questions about the mechanics of the metal cutting process / N.N. Zorev. - M. : Mashgiz, 1956. – 368 p.
15. Sokolovsky A.P. Vibrations when working on metal cutting machines / A.P. Sokolovsky // *Research on oscillating metal cutting machines when cutting metals: Sat. scientific tr.* - M.: Mashgiz, 1958.– P.3–23.
16. Tlusty G., *Manufacturing Equipment and Processes*. – NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000. – 928p.
17. Celikag H. Can mode coupling chatter happen in milling? / H. Celikag, E. Ozturk, N. D. Sims // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. – P. 103738. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103738>
18. Yuan L. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber / L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, W. Li, // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – 117, P. 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.051>
19. Mohammadi Y. Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning / Y. Mohammadi, K. Ahmadi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2022. – 537. – P. 117158. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
20. Wang A. Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity / A. Wang, B. Zhou, W. Jin // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2024. – 166. – P. 104851.
21. Panovko Y.H. Fundamentals of the applied theory of vibration and shock L. : *Машиностроение* 1976, 320 p.
22. Alifov A. AND. Mixed forced, parametric and self-oscillations with a non-ideal source of energy and retarding forces // *Izvestiya uzov. PND* 2021. Vol. 29, issue 5. S. 739-750. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2021-29-5-739-750>.
23. Ahmadi K. Bayesian updating of modal parameters for modeling chatter in turning / K. Ahmadi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2022. – 38. P. 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.006>

24. Fundamentals of the theory of cutting materials: a textbook [for higher educational institutions] / M. P. Mazur, Yu. M. Vnukov, A. I. Grabchenko and others; ed. by M. P. Mazur. – 4th ed., revised and supplemented – Lviv: Novyj Svit-2000, 2022. – 471 p. – ISBN 978-966-418-105-82.
25. Itintas Y. Chatter Stability of Machining Operations / Itintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., Kilic, J. Z. M. // *Manuf. Sci. Eng.* – 2020. – 142(11). – P. 110801 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4047391>.
26. Kuchma, L.K. Vibrations when working on milling machines and methods of their suppression / L.K. Hairy fur cap. - M.: USSR, 1959. - 122 p.
27. Vnukov Y. Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering.* – 2024. – 74(1). – P. 169-180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>.

Відомості про авторів / About the Authors

Внуков Юрій Миколайович (Vnukov Yurii) – доктор технічних наук, професор, незалежний вчений, Valley Village, LA, California, USA; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-0018>; e-mail: urahar@ukr.net.

Тришин Павло Романович (Tryshyn Pavlo) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3301-5124>; тел.: (066) 148-92-76; e-mail: trishin87@gmail.com.

Козлова Олена Борисівна (Kozlova Olena) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5913>; тел.: (050) 486-54-27; e-mail: kozlova@zp.edu.ua.

О. А. ОХРИМЕНКО, О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, Є. В. МИРОНЕНКО, К. В. КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА, Л. В. КЛОЧКО, С. С. ГЛУШКО, Є. О., ПЕРМЯКОВ, В. С. ФЕДОРЕНКО

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШВИДКІСНОЇ ЗУБООБРОБКИ ЗАГАРТОВАНИХ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Забезпечення високих експлуатаційних характеристик загартованих крупномодульних зубчастих коліс прямо залежить від параметрів їхнього поверхневого шару. У межах цього дослідження було проаналізовано теоретичні підходи щодо формування зв'язку між характеристиками стану поверхні зубів і режимами механічної обробки. Встановлено, що зв'язок між технологічними умовами зубообробки та параметрами поверхневого шару можна описати системою аналітичних рівнянь. Ці рівняння можуть бути використані при створенні алгоритмів і програм для вибору оптимальних технологічних режимів обробки з урахуванням необхідних параметрів якості поверхневого шару, які забезпечують довговічність роботи зубчастих пар. Процес пластичного деформування матеріалу при обробці пов'язаний із геометрією ріжучого інструмента, зокрема з радіусом заокруглення його ріжучої крайки. Зміна цього радіуса впродовж обробки обумовлена умовами навантаження та характеристиками оброблюваного матеріалу. Цей вплив розглянуто з урахуванням кінематики взаємодії інструмента з деталлю, що дозволяє стабілізувати якість поверхневого шару при виготовленні зубчастих коліс.

Ключові слова: функціональні властивості, експлуатація, крупногабаритні зубчасті передачі, формування похибок, зносостійкість, зубофрезерування, режими різання,

О. А. OKHRIMENKO, O. Yu. ZAKOVOROTNY, E. V. MIRONENKO, K. V. KAMCHATNA-STEPANOVA, L. V. KLOCHKO, S. S. GLUSHKO, E. O. PERMYAKOV, V. S. FEDORENKO

WAYS TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED GEAR MACHINING OF HARDENED LARGE-MODULE GEARS

Ensuring high performance characteristics of hardened large-module gears directly depends on the parameters of their surface layer. Within this study, theoretical approaches to establishing the correlation between surface condition characteristics of gear teeth and machining parameters have been analyzed. It has been determined that the relationship between the technological conditions of gear processing and the surface layer parameters can be described by a system of analytical equations. These equations can be employed in the development of algorithms and software for selecting optimal machining modes, taking into account the required surface quality parameters that ensure the long-term performance of gear pairs. The process of plastic deformation during machining is closely related to the geometry of the cutting tool, particularly the radius of curvature of its cutting edge. Changes in this radius throughout the machining process are determined by loading conditions and the properties of the workpiece material. This influence has been analyzed considering the kinematics of tool-workpiece interaction, which allows stabilization of surface layer quality during gear manufacturing.

Keywords: functional properties, performance, large-size gear transmissions, error formation, wear resistance, gear milling, cutting modes.

Вступ. Функціональна надійність зубчастих передач значною мірою залежить від контактних характеристик поверхонь, що утворюються в результаті остаточної обробки. Ефективне забезпечення експлуатаційних параметрів досягається через комплексне врахування механічних методів впливу на поверхню та принципів функціонально-вартісного підходу до вибору технологічних рішень.

Дослідження у напрямку підвищення продуктивності зубообробки, водночас забезпечуючи задані параметри мікрогеометрії поверхні, які є критично важливими для експлуатаційних характеристик крупномодульних зубчастих коліс (ЗКЗК)

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До важко навантажених зубчастих передач відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. Сюди, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, що працюють в обмеженому просторі. Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної сили навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу. До цього слід додати динамічний характер зовнішнього навантаження і значну забрудненість навколишнього середовища дрібнодисперсними речовинами абразивного характеру [1, 17]. Всі перераховані фактори сприяють зниженню надійності машин і їх приводів, габарити і маса яких в основному визначаються параметрами зубчастих передач.

Підвищення ефективності обробки зубчастих коліс передбачає глибоке вивчення фізичних процесів, що супроводжують формування стружки та відділення матеріалу в зоні різання. Зокрема, при високошвидкісному зубофрезеруванні пластична деформація матеріалу здійснюється за комбінованою схемою стиснення і зсуву [1].

Аналіз механізмів формування похибок крупногабаритних зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, які визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки крупногабаритних зубчастих коліс [2, 4, 6, 14, 16, 18].

У зв'язку з тим, що досліджувані похибки обробки виникають в результаті впливу ряду випадкових факторів, характеристики яких, в залежності від рівня складності структурної будови похибок, є величинами або функціями, що носять випадковий характер прояви, їх визначення можливо з використанням методів теорії ймовірностей.

Сучасні тенденції розвитку машинобудування призводять до ще більшого посилення вимог до параметрів якості передач при їх проектуванні внаслідок:

- збільшення об'ємних і контактних напружень при значній нерівномірності їх розподілу;
- збільшення швидкостей ковзання і температур внаслідок зростання продуктивності машин;

– підвищення ймовірності відмов через ускладнення конструкцій машин і збільшення економічних втрат за час усунення відмов (втрачена вигода);

Підвищення довговічності приводів машин є одним з найважливіших (поряд з підвищенням продуктивності і зниженням собівартості) вимог до проектування машин, яке в значній мірі забезпечується за рахунок збільшення ресурсу основних деталей приводу і, в першу чергу, за рахунок підвищення зносостійкості їх контактних поверхонь. [3, 4, 7, 8, 10, 13]

Несуча здатність і зносостійкість зубчастих передач приводу визначається рівнем конструктивних рішень щодо забезпечення оптимальних умов роботи передач, якістю їх виготовлення і ступенем відповідності умов експлуатації режимів, прийнятих при їх проектуванні.

Конструктивні рішення щодо забезпечення необхідної несучої здатності зубів зубчастих передач зазвичай базуються на виконанні умов запобігання двох основних видів пошкоджень – поломок зубів (статичних і втомних) і контактного утомного викришування (підтіг) робочих поверхонь.

Методи розрахунку згинальної і контактної витривалості досить добре розроблені, пройшли багаторічну експлуатаційну перевірку і є основними методами розрахунку зубчастих передач на міцність, що знайшло своє відображення в стандартах Міжнародного Комітету по Нормалізації ISO/DIS 6336 / III (згинальна витривалість) і ISO/DIS (контактна витривалість), а також в стандарті ГОСТ 21354-87 [2, 8, 11, 12, 16, 18,].

Зносостійкість визначається як властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя. Відповідно, зношування являє собою процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виявляється у відділенні з поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації [9, 14].

У зубчастих передачах важконавантажених машин має місце граничне тертя кочення з проковзуванням. При цьому основним видом зношування є абразивно-втомне механічне зношування, а в разі настання заїдання – молекулярно-механічне.

Відповідно до роботи [6, 17], при високих швидкостях різання умови деформування в зоні стружкоутворення такі, що теплота від деформації в зоні локалізованого зсуву тобто дифузійні процеси не можуть реалізуватися і опір зсуву тедв знижується.

Можливість реалізації адіабатичного зсуву при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом пов'язана, перш за все, з низькими значеннями тепло- та температуропровідності. Внаслідок цього припускають, що нижчі значення опору зсуву титанового сплаву порівняно з $\sigma_{сдв}$ сталей, одержувані при їх різанні, обумовлені цією обставиною.

Результати численних досліджень показують, що в зоні первинної і вторинної деформації відбувається впорядковане витягування кристалів у напрямку площини зсуву, формуючи так звану "текстуру цементиту", яка характеризується витягнутими зернами.

Експерименти підтверджують: у зоні зсуву (СДВ) опір пластичній деформації зберігає стабільне значення через насичення деформаційними дефектами. У процесі швидкісного різання сталі спостерігається еволюція типів стружки: від елементної — до зливної, і згодом до сегментної. Для титанових і жароміцних сплавів сегментна стружка формується навіть при помірних швидкостях обробки [2, 3].

Мета дослідження. Дослідження технологічних умов довговічності крупногабаритних зубчастих передач по початковим параметрам евольвентних профілів зубів без урахування забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс з вельми наближеною, не відображає того факту, що через знос зубів форма профілю стає відмінною від початкової евольвентної поверхні. В результаті чого змінюються навантажено-кінематичні параметри контакту, які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі [1, 2, 3, 15, 18].

Загальна імітаційна модель формування та прогнозування інтермітентності в результаті зносу форми робочої поверхні зубів спрямована на розробку засобів диференційованого і комплексного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації та дозволяє науково обґрунтувати зміни якісних характеристик крупногабаритних зубчастих передач в залежності від часу їх експлуатації, є актуальною і відповідає вимогам науково-технічного прогресу сучасного машинобудування.

Основна частина. Формування адіабатичного зсуву при швидкісному зубофрезеруванні обумовлюється низькими показниками теплопровідності і температуропровідності оброблюваних сплавів. Це пояснює зменшення опору зсуву титанових сплавів у порівнянні зі сталями в аналогічних умовах.

Сучасні підходи до зубофрезерування постійно еволюціонують у напрямку підвищення продуктивності та точності. Одним із ключових завдань є скорочення технологічного часу обробки без шкоди для якості поверхневого шару. Ефективність процесу можна оцінити за формулою розрахунку базового часу механічної обробки t_0 :

$$t_0 = \frac{(b+y_1+y_2)z\pi D_f}{Sk10^3v} \quad (1)$$

де: b – ширина вінця зубчастого колеса, мм;

y_1 – довжина входу фрези при обробці;

y_2 – довжина виходу фрези з матеріалу;

z – кількість зубів оброблюваної шестерні;

D_f – діаметр фрезерного інструменту, мм;

S – подача на оберт заготовки, мм/об;

k – число проходів фрези;

v – швидкість різання при високошвидкісному фрезеруванні, м/хв.

З метою інтенсифікації процесу зубообробки можуть застосовуватись такі стратегічні підходи:

- Підвищення швидкості обертання фрези сприяє скороченню часу обробки та зменшенню теплового впливу на заготовану поверхню.
- Збільшення подачі дозволяє обробити більший об'єм матеріалу за меншу кількість проходів.
- Скорочення траєкторії переміщення інструменту (тобто шляхів y_1 та y_2) оптимізує використання ресурсу верстата.
- Збільшення кількості робочих заходів інструменту на чорнових стадіях обробки розвантажує зуб фрези і підвищує її довговічність.
- Визначення регламентованих параметрів обробки, зокрема геометрії різальної частини інструменту (радіуса заокруглення леза) та мінімального кута врізання без припуску, забезпечує стійку якість поверхні.

Одним із ефективних методів підвищення швидкісних режимів зубофрезерування є створення сприятливих умов формування профілю зуба. Це досягається шляхом оптимального вибору режимів різання, застосуванням інструментів з високотвердих сплавів, зокрема мінералокераміки, а також розробкою раціональних схем обробки.

Ще одним резервом підвищення ефективності є поєднання осевого та радіального рухів фрези, що дозволяє зменшити час переходів та підвищити стійкість інструменту.

Зокрема, для черв'ячних модульних фрез продуктивність підвищується за рахунок раціонального управління моментом входження зуба фрези в заготовку. За умови мінімального кута врізання та обробки без припуску досягається зменшення контактного навантаження, що позитивно впливає на довговічність інструмента.

До інноваційних рішень, що дозволяють значно покращити ефективність, слід віднести:

1. Використання спеціальних дискових немодульних фрез із збільшеним діаметром (300–450 мм), що забезпечують стійку геометрію ріжучих елементів.
2. Застосування гнучкої кінематики, при якій відсутній жорсткий зв'язок між обертанням інструменту та заготовкою, що дозволяє адаптувати процес до динаміки навантажень.
3. Регулювання профільного коефіцієнта формоутворення відповідно до жорсткості системи "інструмент – верстат – заготовка".

Сукупне використання зазначених підходів дозволяє реалізувати високопродуктивні та надійні технологічні процеси обробки зубчастих елементів великого модуля із гатованою структурою. При цьому гарантовано зберігається належний рівень точності та експлуатаційної надійності оброблених поверхонь.

Як встановлено у попередніх дослідженнях, жорсткість технологічної верстатної системи є визначальним чинником при досягненні необхідної якості поверхневого шару, зокрема параметра шорсткості. При незмінних умовах — швидкість обробки $v=2,5$ м/с, радіус заокруглення ріжучої кромки $\rho=50$ мкм та інших стабільних технологічних параметрах, аналогічних попереднім серіям дослідів, було отримано таку узагальнену аналітичну залежність:

$$R_z = 133,11 + 435S - 500[S(1 - 0.25S)]^{0.5} + \frac{9200S^{0.5}}{j}, \quad (2)$$

де: S — подача, мм/об,

j — жорсткість технологічної системи, Н/мм.

Аналіз графічних результатів, наведених на рис. 1, засвідчив чітко виражений вплив жорсткості системи на параметр шорсткості R_z , що проявляється особливо інтенсивно зі збільшенням подачі. Отримані теоретичні й експериментальні залежності демонструють, що при різних подачах можливо досягти однакових значень шорсткості, проте це вимагає коригування жорсткісних характеристик технологічної схеми.

З цього випливає практично важливий висновок: при забезпеченні заданої якості поверхні шестерень варто обов'язково враховувати жорсткість ТСС як один з ключових параметрів системи обробки.

Ще одним аспектом, що заслуговує на увагу, є відносна довжина опорної лінії шорсткого профілю, яка при зубофрезеруванні залишається незмінною щодо режимів обробки. Цей висновок було підтверджено узагальненням результатів 50 експериментів, які наведені у вигляді середніх значень з відповідними інтервалами розсіювання на рис. 2. Добра відповідність між теоретичною кривою та усередненими експериментальними значеннями свідчить про достовірність моделі та підтверджує її практичну застосовність.

Варіації параметра t_p пояснюються впливом таких чинників, як:

- шорсткість ріжучої кромки фрези R_{zbp} ,
- радіус заокруглення ρ ріжучої кромки,
- жорсткість ТСС j ,
- неоднорідність твердості по глибині шару ΔHRC .

Загальний аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що висота нерівностей шорсткого мікрорельєфу зубчастого колеса при зустрічному фрезеруванні визначається комплексом факторів, серед яких домінуючий вплив мають величина подачі S_{min} та радіус заокруглення ріжучої кромки ρ .

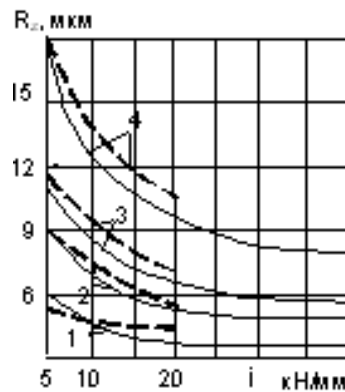
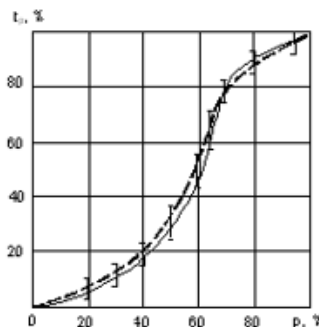


Рис. 1 – Графічне відображення впливу жорсткості технологічної верстатної системи j на величину параметра шорсткості R_z

Для досягнення найнижчих значень параметра шорсткості поверхні при фінішному зубофрезеруванні доцільно забезпечити мінімально можливий радіус заокруглення ріжучої кромки інструмента — ρ . У випадку, коли цей радіус дорівнює 50 мкм, а шорсткість ріжучої кромки R_z становить 0,5 мкм, за умови коефіцієнта тертя $\mu=0,3$, модуля пружності $E=19,6$ ГПа, межі пружності оброблюваного матеріалу $\sigma_t=1590$ МПа та застосування твердосплавного інструмента типу ВК100М з $\tau_0=1290$ МПа, можна обчислити граничне значення шорсткості, що формується на обробленій поверхні при використанні мінімальних значень подачі:

$$R_{zmin} = 500\sqrt{1 \cdot 0,05} \left(1 - \frac{2 \cdot 29,3}{60} \right) + 0,5 = 3,11 \text{ мкм}$$



Суцільна лінія - теорія, штрихова - експеримент)

Рис. 2 – Зміна параметра t_p в залежності від радіуса округлення ріжучої крайки інструменту під час зустрічного зубофрезерування

Таким чином, отримані аналітичні вирази з достатньою точністю відображають закономірності формування мікрогеометрії обробленої поверхні. Представлені залежності підтверджують ефективність

використання швидкісного зубофрезерування з інструментом, оснащеним ріжучими пластинами з мінералокераміки (ФОМ).

Побудовані математичні моделі розподілу мікронерівностей — виступів і западин — поверхневого профілю при обробці ФОМ забезпечують встановлення взаємозв'язків між висотними характеристиками шорсткості. Зокрема:

$$R_a = 0,18R_z, \quad (3)$$

$$R_{max} = 1,35R_z, \quad (4)$$

Крокові параметри шорсткості при зубофрезеруванні інструментом з мінералокерамічними пластинами визначаються співвідношеннями:

$$S_m = \frac{t_m S_{np}}{B} \zeta \left(\frac{N}{S_{np}} - 1 \right), \quad (5)$$

$$S = \frac{S_{np}}{\sum_0^t 2} \zeta \left(\frac{N}{S_{np}} - 1 \right), \quad (6)$$

Припускаючи, що для умов обробки з використанням ФОМ мікрогеометрія поверхні має випадковий розподіл, отримуємо залежність для розрахунку відносної довжини опорної лінії профілю t_p залежно від радіуса округлення ріжучої крайки ρ :

$$\text{при } \rho \leq 0,050\text{мм}; t_p = 0,02\rho_2, \quad (7)$$

$$\text{при } \rho > 0,050\text{мм}; t_p = 100 - 0,02(100 - \rho)^2, \quad (8)$$

Таким чином, розроблені аналітичні моделі доводять, що ключовими факторами, які впливають на формування мікропрофілю при швидкісному зубофрезеруванні з використанням мінералокерамічних пластин, є режими різання, геометричні параметри інструменту (насамперед радіус округлення крайки), діаметр фрези, а також початкова твердість оброблюваного матеріалу.

Однак, реалізація високопродуктивної зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі зазначених підходів призводить до виникнення похибок у вигляді поздовжньої хвилястості уздовж профілю зуба. Ці мікродефекти потребують окремого аналізу, оскільки можуть істотно впливати на експлуатаційні характеристики елементів зубчастих передач.

Висновки.

Новий підхід прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання ґрунтується на методі Монте – Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень параметрів стану поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими задачами, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі імітаційного моделювання прогнозування з заданою вірогідністю похибок, які виникають, а також задачі управління, в тому числі оптимального, цими похибками.

Результати експериментального визначення навантаження заїдання, для умов експлуатації важконавантажених гірських машин, дозволили уточнити значення коефіцієнта: для нелегованих масел – $c_p = 1,7$; для масел, легованих протизадирними присадками – $c_p = 2,2$.

Список літератури

1. Шелковой А.Н., Гасанов М.И., Набока Е.В., Ключко А.А., Белоусов Н.А., Новиков Ф.В. Имитационное моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупногабаритных зубчатых колес. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 22-24 сентября 2021 г., г. Одесса. – Одесса: Государственный университет «Одесская политехника», 2021. – С. 207 – 210.
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Ключко, М.И.

- Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Полонський, Л. Г., Ключко, О. О., Охріменко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, 1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
7. Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
8. Гасанов М.И., Ключко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
9. Гасанов М.І., Ключко О.О., Заковоротний О.Ю., Перминов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079-004X.
10. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вып. 8. – С. 61–70.
11. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Ключко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.
12. Ключко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.
13. Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охріменко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і руйнування зрізуючого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчастих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
14. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicky Vjesnik*, 25(2), 643-648.
16. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402-1-11.
17. Нежебовський В.В., Дергоусов В.М., Пермяков О.А., Ключко О.О., Устиненко О.В., Рябченко С.В. Новітні процеси обробки зубчастих коліс редукторів вугледобувних комбайнів // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01–03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 162–163. – ISBN 978-617-7889-20-4.
18. Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Ключко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укд200-500 нового покоління // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

References (transliterated):

1. Shelkovi A.N., Gasanov M.I., Naboka E.V., Klochko A.A., Belousov N.A., Novikov F.V. Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniia ekspluatatsionnykh svoistv krupnogabaritnykh zubchatykh koles. *Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i enerhosberezenii: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi*

- konferentsii, 22–24 sentiabria 2021 g., g. Odessa. – Odessa: Gosudarstvennyi universitet «Odessaia politehnika», 2021. – S. 207–210.
2. Kovalev Viktor D., Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
 3. Tekhnolohichni osnovy zuboobrobky zakalenykh krupnomodulnykh zubchatykh koles: monografiia / A.A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.
 4. Issledovanie protsessov zubofrezerovaniia zakalenykh shevronnykh zubchatykh koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzhytskii // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnologichnykh system: zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2017. – Vyp. 40. – S. 90–101.
 5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>
 6. Polonskyi, L.H., Klochko, O.O., Okhrimenko, O.A., Betsko, Yu.M., Koval, B.H., & Khraban, D.V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profiliiu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system. *Tekhnichna inzheneriia*, (1(93)), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
 7. Gasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektiva doslidzhennia protsesu shvydkisnogo abrazyvnoho zubofrezeruvannia tsylyndr ychnykh zubchatykh koles // Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovy-tekhnichnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24–25.
 8. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashyna G.I., Perminov E.I. Gruppovye marshrutnye tekhnologicheskie protsessy vosstanovleniia krupnogabaritnykh zubchatykh koles na osnove imitatsionnogo modelirovaniia s uchetom progressiruiushchikh vidov iznosa // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnologichnykh system: zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – Vyp. 42. – S. 28–36.
 9. Gasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Yu., Perminov E.V. Tekhnolohichni rehlyment optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velikohabaritnykh vidkrytykh zubchatykh peredach // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – № 6 (1282). – S. 107–112. ISSN 2079-004X.
 10. Shelkovi A.N., Klochko A.A., Gasanov M.I. Obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv zakalenykh zubchatykh koles / A.N. Shelkovi, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. – Sevastopol: FGAVO UO «Sevastopolskii gosudarstvennyi universitet», 2017. – Vyp. 8. – S. 61–70.
 11. Funktsionalnye aspekty imitatsionnogo matematicheskogo modelirovaniia heometriinykh parametrov protsesa zubofrezerovaniia / O.M. Shelkovi, O.O. Klochko, M.I. Gasanov, D.O. Kravchenko, O.O. Antsyferova // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 26 (1248). – S. 66–74. – Bibliogr.: 6 nazv. – ISSN 2079-004X.
 12. Klochko A.A., Gasanov M.I., Basova E.V. Reglyment vyboru i naznacheniiia parametrov stanu poverkhnevoho sharu zakalenykh zubchatykh koles. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 33 (1205). – S. 145–157. – Bibliogr.: 7 nazv. – ISSN 2079-004X.
 13. Klochko O.O., Gasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Maiboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezeruvanni zakalenykh tsylyndricheskikh zubchatykh koles na osnovi atomnogo pidkhotu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. inst». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5). – S. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
 14. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92–104.
 15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicky Vjesnik*, 25(2), 643–648.
 16. Ciavarella, M. (2017). On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories. *ASME J. Tribol.*, 139, 021402–1–11.
 17. Nezhebovskiy V.V., Derhousov V.M., Permiakov O.A., Klochko O.O., Ustynenko O.V., Riabchenko S.V. Novitni protsesy obrobky zubchatykh koles reduktoriv vuheldobuvnykh kombainiv // Vazheke mashynobuduvannia. Problemy

ta perspektyvy rozvytku. Materialy XX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 01–03 veresnia 2022 roku / za zah. red. V.D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2022. – S. 162–163. ISBN 978-617-7889-20-4.

18. Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i toch-nosti rozmiriv tsylindrychkyh zakalenykh zubchatykh koles ochnystoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. inst». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6). – S. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02

Надійшла (received) 10.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Okhrimenko Oleksandr Anatoliiovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotnyi Oleksandr Yuriiovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: arcade@i.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X

Мироненко Євген Васильович (Mironenko Evgen Vasylovych) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризованих мехатронічних систем, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ; тел.: (050)-604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna Valeriivna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: katerina.ks@i.ua, ORCID: 0000-0001-7825-1238

Клочко Лариса Володимирівна (Klochko Larysa) – методист першої категорії відділу забезпечення якості освітньої діяльності Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38096-8295602, e-mail: klochko1971@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1488-0709

Глушко Станіслав Сергійович (Hlushko Stanislav) – аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +380967871482 e-mail: glushko1979@ukr.net, ORCID: 0009-0006-2459-2153;

Пермяков Єгор Олександрович (Permyakov Egor) – аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108,

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3781-6144

*МЕЗЕНЦЕВА І.О., МЕЗЕНЦЕВ С.М.***ВПЛИВ НА ПРОДУКТИ ЕРОЗІЇ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ**

В роботі приведені основні види електроерозійної обробки матеріалів. Розглянуті основні фізичні процеси, які відбуваються при електроерозійній обробці деталей із складнолегованих сталей. Показано, що всі різновиди електроерозійної обробки металів засновані на використанні явища електричної ерозії. Вказано, що найбільший вплив на кількість утворення оксидів у продуктах ерозії мають властивості електричного розряду. Представлені дані електронно-мікроскопічних та петрографічних досліджень продуктів ерозії. Встановлено, що основними компонентами відходів є металева фаза, яка складає приблизно 62-65% та оксидна фаза – 25-28%. Запропоновано подальше ретельне дослідження продуктів ерозії задля визначення вибору відновника для відновлення металевої фази із продуктів ерозії.

Ключові слова. Електроерозійна обробка, електричний розряд, продукти ерозії, окислені відходи, легування сталей, процес відновлення.

I. MEZENTSEVA, S. MEZENTSEV**THE INFLUENCE OF PHYSICAL PROCESSES OF ELECTRIC EROSION MACHINING OF COMPLEX ALLOYED STEELS ON EROSION PRODUCTS**

The paper presents the main types of electroerosion processing of materials. The main physical processes that occur during electroerosion processing of parts made of complex alloy steels are considered. It is shown that all types of electroerosion processing of metals are based on the use of the phenomenon of electrical erosion. It is indicated that the properties of the electric discharge have the greatest influence on the amount of oxide formation in erosion products. Data from electron microscopic and petrographic studies of erosion products are presented. It is established that the main components of the waste are the metal phase, which is approximately 62-65% and the oxide phase - 25-28%. Further careful study of erosion products is proposed to determine the choice of a reducing agent for the recovery of the metal phase from erosion products.

Keywords. Electroerosion processing, electric discharge, erosion products, oxidized waste, alloying of steels, recovery process.

Вступ. На підприємствах машинобудівного профілю одним із найбільш розповсюджених технологічних процесів є обробка матеріалів різанням. Обробка матеріалів різанням – найбільш трудомістка частина технологічного процесу виготовлення деталей, у верстатобудуванні вона досягає 60 %. Основні характеристики обробки матеріалів різанням це - висока маневреність і гнучкість, можливість виготовлення різноманітних деталей зі складними фасонними поверхнями, висока точність, велике різноманіття і невелика вартість інструменту, гнучкість обладнання при переналадці та висока продуктивність [1].

Для обробки твердих складнолегованих сталей та сплавів, які важко піддаються механічній обробці, а також деталей складної конфігурації з успіхом використовуються електрофізичні та електрохімічні методи розмірної обробки [2-4]. До електрофізичних методів обробки відноситься електроерозійний метод обробки деталей. Електроерозійний метод застосовують при обробці порожнин кувальних, вирубних, формувальних та інших штампів, прес-форм, ливарних форм, висадкового та фасонного металорізального інструменту, деталей паливної апаратури, газотурбінних двигунів, різних приладів та виробів тощо.

При електроерозійній обробці деталей утворюються відходи (продукти ерозії), які можуть накопичуватися на територіях підприємств. До складу відходів входять сполуки таких елементів, як нікель, вольфрам, молібден, кобальт, хром, титан та ін. Хімічний склад продуктів ерозії обумовлюється матеріалом, із якого виготовлена заготовка та матеріалом електроду. Основні сполуки зазначених елементів є токсичними і надають шкідливий вплив при потраплянні у ґрунт на прилеглих до підприємств територій [5, 6].

У той же час відходи електроерозійної обробки деталей із кольорових сплавів або складнолегованих сталей є цінною вторинною сировиною, яку можна використовувати як комплексну добавку для легування чавунів та сталей [7-10]. Метали, що входять до складу відходів, такі як нікель, хром, молібден, вольфрам, титан є основними легуючими елементами в сталях і чавунах [11, 12].

Для того щоб запропонувати ефективний метод утилізації відходів необхідно провести аналіз природи фізичних процесів, які відбуваються при даній обробці деталей, а також дослідити їх вплив на склад та характеристику продуктів ерозії, що при цьому утворюються.

Аналіз літератури. Фізичні процеси, які виникають при електроерозійному методі обробки матеріалів досліджувались вітчизняними і закордонними вченими [13-16]. Цей метод заснований на використанні перетвореної в тепло енергії електричних розрядів, що виникають між інструментом (електродом) і заготовкою. Залежно від виду електричного розряду (іскри, дуги), параметрів імпульсу струму, напруги та інших умов електроерозійна обробка включає чотири основні різновиди: електроіскрову, електро-імпульсну, електроконтактну та анодно-механічну. Кожна з цих обробок відрізняється вихідними технологічними характеристиками, обладнанням та має свою галузь промислового застосування. Проте, всі різновиди електроерозійної обробки металів засновані на використанні явища електричної ерозії.

Зазначено, що фізичний механізм електроерозійної обробки залежить від енергії імпульсу струму, що розподіляється в аноді, катоді та розрядній колоні.

Концентрований потік енергії виробляється протягом дуже короткого періоду часу. В результаті надлишок металу видаляється з робочої поверхні заготовки. Поверхня змінює свою структуру та властивості, електрод зношується, а робоча рідина розкладається. Під час видалення з поверхні надлишковий метал переходить у рідкий або газоподібний стан, або залишається в твердому стані.

Кількість надлишкового металу, що видаляється, в газоподібному стані збільшується зі зменшенням часу імпульсу струму при незмінній енергії імпульсу. Робоча рідина збирається у розрядного каналу і випаровується. Утворюється газове середовище під тиском у сотні атмосфер. У результаті робоча поверхня піддається сильному механічному впливу. Наступна конденсація металовмісної пари призводить до значного зниження тиску газового середовища до значень нижче атмосферного. Перегрітий розплавлений метал із поверхні починає кипіти. Відбувається вибухове розбризкування металу в повітря. Такий же процес призводить до формування твердих циліндрів з залишками рідкого металу, що залишається на поверхні.

Розплавлений метал окислюється серед водяної пари. Тонка плівка оксидів, що утворилися, покриває відносно великі гранули продуктів ерозії, захищаючи їх від подальшого окислення, так що вміст оксидів всередині них невеликий. Найменші гранули, що мають розмір 0,1 - 1 мкм, окислюються повністю. Зважаючи на те, що оксиди, що утворилися, знаходяться в аморфному стані, їх неможливо виявити рентгенівським методом, проте металографічне дослідження показує багато точкових включень оксидної фази. Таким чином, оксидна фаза присутня у вигляді плівок на поверхні матеріалу, що утворився, і у вигляді крапель на ньому.

Кількісний вміст оксидів залежить від властивостей електродних матеріалів і від середовища, в якому вони знаходяться. Однак найбільший вплив надають властивості електричного розряду, а саме, їх зміст значно зростає зі збільшенням періоду розряду при незмінній силі розряду. Утворення оксидів відбувається за рахунок взаємодії кисню середовища, в якому відбувається обробка, з поверхнею розплавлених окремих більших або дрібних частинок, які викидаються з ураженої розрядом поверхні електрода. Конденсація речовини з газоподібного стану, металева пара і кисень, на поверхні частинки сприяє зростанню кристалів оксидів на поверхні частинки в процесі її кристалізації. Приблизна кількість оксидів, які утворилися при електроерозійній обробці при використанні у якості електрода армо заліза приведено на рисунку 1.

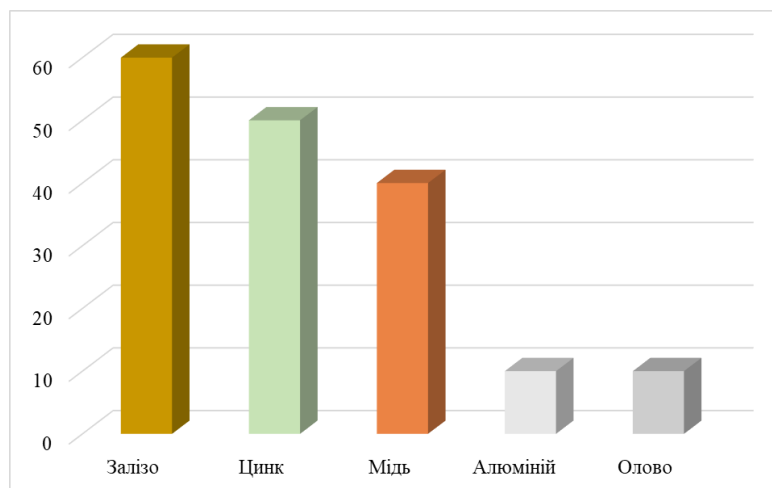


Рис.1 – Приблизна кількість оксидів (%) у продуктах ерозії при використанні у якості електродів армо заліза

Мета роботи. Метою роботи є дослідження впливу фізичних процесів електроерозійної обробки деталей із складнолегованих сталей на продукти ерозії для визначення ефективного методу їх утилізації.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження базується на джерелах інформації, в яких надаються відомості щодо впливу фізичних процесів, що відбуваються при електроерозійній обробці, на характеристику та склад продуктів ерозії.

Відходи, що утворюються при електроерозійній обробці деталей із складнолегованих сталей, є гранулами, які були досліджені за допомогою електронно-мікроскопічного та петрографічного методів.

Електронно-мікроскопічний аналіз – один із методів дослідження мікроструктури твердих тіл, їх електричних та магнітних полів, локального складу із застосуванням сукупності електронно-зондових методів.

Петрографічний метод - засновано на порівнянні речовинного складу, структурних і текстурних особливостей, кольору, наявності характерних тільки їм властивих мінералів у пластах порід. Фазовий склад продуктів ерозії вивчали на полірованих шліфах під металографічним мікроскопом. Зразки для аналізу готували таким чином: вибирали різні ділянки продуктів ерозії та готували полірований шліф.

Були отримані світліни продуктів ерозії проведених досліджень, які потім були проаналізовані та описані за допомогою відповідних спеціалізованих даних.

Результати досліджень.

Вторинний матеріал, що утворився з гранульованих відходів електроерозійної обробки, в цілому є неоднорідною пористою речовиною сірого кольору, що має багато включень блискучого металу. При візуальному розгляді видно, що на зламі гранул безліч коричневих частинок, які, ймовірно, є оксидами заліза. Форма гранульованих відходів середнього та великого розмірів близька до сферичної. Гранульовані відходи є комплексним агломератом. Для більш досконалого використання відходів при легуванні сталей та чавунів виникає потреба у більш ретельному їх дослідженні.

Був проведений електронно-мікроскопічний аналіз продуктів ерозії, який дозволив отримати світлини зразків із збільшеною структурою у 50 та 200 разів. Зустрічаються частинки досить великих розмірів 300-500 мкм, переважають частинки близько 1 мкм і є також дуже дрібні частинки 0,01 мкм, які утворюють пухку пористу масу.

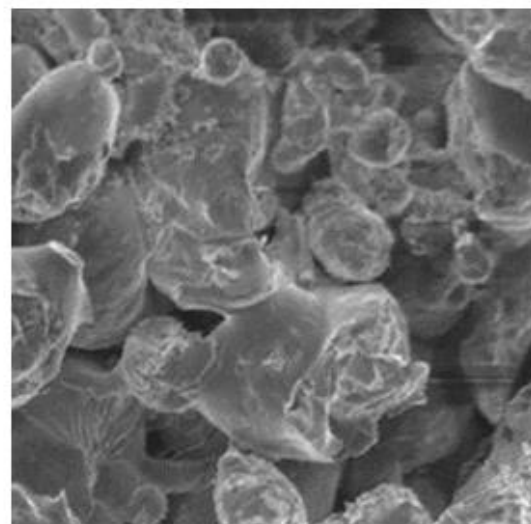
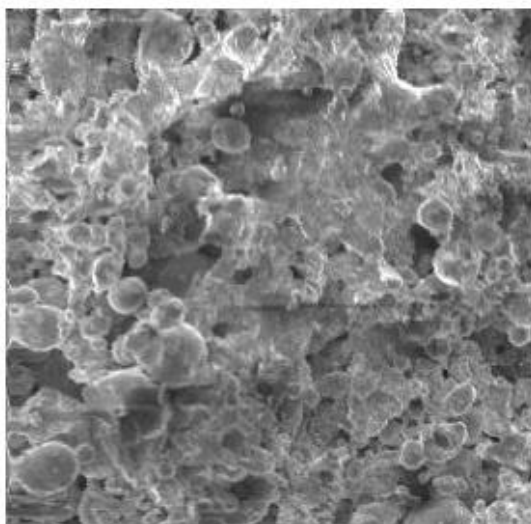


Рис.2 – Електронно-мікроскопічний аналіз продуктів ерозії

Окрім електронно-мікроскопічних досліджень відходів були проведені петрографічні дослідження. Фазовий склад відходів вивчали на полірованих шліфах на металографічному мікроскопі. Петрографічні дослідження під мікроскопом показані на рисунку 3.

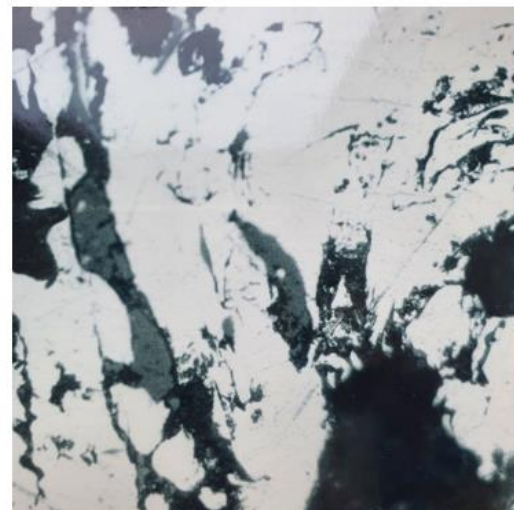
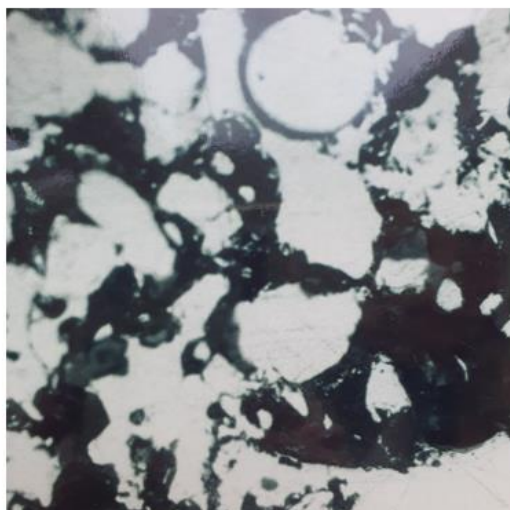


Рис.3 – Петрографічні дослідження під мікроскопом

Обговорення результатів.

При електронно-мікроскопічних дослідженнях було встановлено, що у відходах електроерозійної обробки містяться частинки, які мають кулясту або близьку до неї форму (рис. 2). Спостерігається чітко виражена межа переходу від однієї ділянки до іншої. Переважна більшість гладких оплавлених форм свідчить

про визначальну роль теплових факторів у процесі електроерозійної обробки. Так, великі та середніх розмірів частинки утворені з рідкого стану, а дрібні частинки найімовірніше сформовані з пароподібного стану та в основному складаються з оксидів металів, що підтверджується приведеними літературними даними.

У досліджених пробах виявлені металева фаза та оксидна фаза. Металева фаза спостерігалася у вигляді округлих, витягнутих неправильної форми утворень (рис. 3). Оксидна фаза чітко видно в центрі зразка та по краях металевої фази. Темні ділянки є пори та тріщини, розміри яких сягають 300 мкм. Також явно простежується кругла та овальна форма металевої фази. Оксидна фаза розташована за межами металевої фази. Розмір частинок металевої фази становить від 20 мкм до 200 мкм, максимальний розмір частинок становить 500 мкм.

Аналіз отриманих даних показує, що основними компонентами відходів є металева фаза, яка складає приблизно 62-65% та оксидна фаза – 25-28%. Це дає підставу припускати можливість утилізації цього виду відходів на металургійних заводах безпосередньо в плавці сталі або чавуну. Легуючі елементи у вигляді оксидних сполук можуть бути вилучені в процесі відновлювальної плавки. Наприклад, автори робіт [10] розглядають технологію переробки, яка полягає в процесі двох етапного відновлення гранульованих окислених відходів і подальше використання частково відновлених гранул в якості легуючої присадки при плавці чавуну.

Для проведення повного процесу відновлення металів із відходів потрібно виконати хімічний аналіз елементів для подальшого визначення типу та кількості відновника. Для визначення напрямку та повноти протікання реакцій відновлення можна скористатися термодинамічними розрахунками, зокрема розрахувати зміну вільної енергії Гіббса [17, 18]. Розрахунок зміни вільної енергії Гіббса необхідно зробити для оксидів, що найбільш ймовірно утворюються при електроерозійній обробці. Результати досліджень дозволять зробити висновок про те, який відновник є найкращим та скорегувати відповідно температуру та тривалість протікання процесу відновлення.

Висновки. Виходячи із результатів досліджень можна сказати:

1. Найбільший вплив на кількість оксидів у продуктах ерозії надають властивості електричного розряду. Вміст оксидів значно зростає зі збільшенням періоду розряду при незмінній силі розряду.
2. Електронно-мікроскопічні та петрографічні дослідження дозволили визначити форму та розмір частинок, які утворюють продукти ерозії, а також зробити висновки щодо фазного складу. Металева фаза складає приблизно 62-65%, а оксидна фаза – 25-28%.

Проведення попередніх досліджень показало присутність у складі продуктів ерозії значної кількості оксидної фази, але питання потребує подальшого ретельного дослідження щодо хімічного складу продуктів ерозії та вибору відновника для відновлення металевої фази із продуктів ерозії.

При цьому ми вважаємо, що слід звернути увагу на термодинамічні розрахунки щодо визначення напрямку та повноти протікання реакцій відновлення для різних елементів та певних видів відновників.

Одержання із даних відходів комплексних легуючих добавок є дуже актуальним завданням, тому що це дозволить знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище та здійснити повернення цінних елементів у виробництво.

Список літератури

1. Пахаренко В.Л., Марчук М.М., Пахаренко О.В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням). Навчальний посібник / В.Л.Пахаренко, М.М. Марчук, О.В. Пахаренко. – 2 -е вид., перероб. і доповн. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), 2018. – 252 с.
2. Набока О. В. Фактори впливу на ефективність сучасної електроерозійної обробки / О. В. Набока, В. А. Фадеев, Ф. М. Євсюкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 2 (8). – С. 122-125. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).14
3. Нетрадиційні методи механічної обробки матеріалів : конспект лекцій / укладачі: Б. А. Ступін, О. В. Івченко, О. Д. Динник, Р. М. Зінченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 149 с.
4. Носуленко В. І. Вплив характеру течії робочої рідини на якість обробки в умовах розмірної обробки металів електричною дугою / В. І. Носуленко, В. М. Шмельов, А. А. Пашенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 11 (1336). – С. 53-57.
5. Крайнюк Є.В., Ольгінський А.Г. Вміст важких і токсичних металів у ґрунті / Є.В. Крайнюк, А.Г.Ольгінський // Людина і довкілля. 2002. - Випуск 3. - С.26-31.
6. Горбенко В. В. Проблеми та перспективи комплексної утилізації відходів електроерозійної обробки, що містять нікель, на підприємствах Харківського регіону / В. В. Горбенка, Л. П. Гуренко, І. О. Винник // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. тр. Темат. вип. : Хімія, хімічна технологія та екологія. - Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 38. – С. 68-72. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32531>
7. Дьомін Д. О. Можливості заміни феросплавів, що застосовуються для легування чавуну, комплексною присадкою на основі нікелю / Д. О. Дьомін, В. В. Горбенко, І. О. Винник // Процеси лиття. - 2002. - № 1. - С. 24-27.
8. Горбенко В. В. Отримання комплексних легуючих добавок з відходів, що містять нікель, після електроерозійної обробки деталей / В. В. Горбенка, І. О. Винник // Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., р. Дніпропетровськ, 28-31 травня 2002 р. - Дніпропетровськ: НГУ, 2002. - С.106-109.
9. Мезенцев С. М. Шляхи отримання феросплавів із відходів машинобудівних підприємств [Електронний ресурс] / С. М. Мезенцев, О. І. Пономаренко, І. О. Мезенцева, Н. С. Євтушенко // Литво. Металургія. 2024 : матеріали 20-ї Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2024 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків ; Київ, 2024. – С. 160-162.
10. Sokolov, V.M. Processing the Ni- And Cr-bearing oxidized scarfing granulates with liquid cast iron / Sokolov, V.M., Gorbenko, V.V., Vinnik, I.A., Mekhed, O.M. // TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium, 2006, 1, p. 453-462.

11. Мезенцев С.М. Особливості легування чавунів та сталей відходами машинобудівних підприємств / С. М. Мезенцев, О.І. Пономаренко, Н.С. Євтушенко, І.О. Мезенцева // Литво. Металургія. 2023 [Електронний ресурс] : матеріали 19-ї, 12-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 10-12 жовтня 2023 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків ; Київ, 2023. – С. 135-137.
12. Мезенцева І. О. Обробка рідкого чавуну відходами, що містять нікель / І. О. Мезенцева, В. В. Горбенко // Східноєвропейський журнал передових технологій = Eastern-European journal of enterprise technologies. - 2011. - № 3/1. - 59-63 с.
13. Ceritbinmez, F., & Kanca, E. (2021). The Effects of Cutting Parameters on the Kerf and Surface Roughness on the Electrode in Electro Erosion Process. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 9(2), 335-346. <https://doi.org/10.29109/gujsc.913417>
14. Abdugarimov, E.T., Mirkarimov, A.S. & Zaripov, A.A. Electroerosion treatment of dielectric materials. Surf. Engin. Appl.Electrochem. 43, 77–82 (2007). <https://doi.org/10.3103/S1068375507020019>
15. Головка Л. Ф. Електроерозійна обробка фасонних отворів множинним розрядом [Електронний ресурс]/Л. Ф. Головка, О. З. Чумаченко // Метал та лиття України. - 2013. - № 3. - С. 33-37. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2013_3_8
16. Щерба А.А., Подільцев А.Д., Кучерява І.М. Дослідження електроерозійних явищ при протіканні імпульсного струму між струмопровідними гранулами з урахуванням плазмового контактного проміжку // Технічна електродинаміка. - 2002. - №4. - С. 3–7.
17. Симонов В.К., Гришин О.М., Івашченко В.П. Розрахунки з теорії процесів відновлення / Навчальний посібник.- Дніпропетровськ: НМетАУ. 2006.-48с.https://nmetau.edu.ua/file/simonov_raschety_po_vosstanovleniyu.2006.pdf
18. Теорія металургійних процесів / В.Б. Охотський, О.Л. Костолов, В.К. Симонов та ін.-К.:ІЗМН, 1997.-512с. <https://www.twirpx.com/file/1749107>

Bibliography (transliterated):

1. Pakharenko V.L., Marchuk M.M., Pakharenko O.V. Tekhnologiya konstruktivnykh materialiv ta materialoznavstvo (obrobka metaliv rizanniam). Navchalnyi posibnyk / V.L.Pakharenko, M.M. Marchuk, O.V. Pakharenko. – 2 -e vyd., pererob. i dopovn. – Rivne: Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya (NUVHP), 2018. – 252 s.
2. Naboka O. V. Faktory vplyvu na efektyvnist suchasnoi elektroeroziinoi obrobky / O. V. Naboka, V. A. Fadeev, F. M. Yevisukova // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. : Tekhnologii v mashynobuduvanni : zb. nauk. pr. = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2023. – № 2 (8). – S. 122-125. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).14
3. Netradytsiini metody mekhanichnoi obrobky materialiv : konspekt lektsii / ukladachi: B. A. Stupin, O. V. Ivchenko, O. D. Dynnyk, R. M. Zinchenko. – Sumy : Sumskiy derzhavnyi universytet, 2016. – 149 s.
4. Nosulenko V. I. Vplyv kharakteru tekhii robochoi ridyny na yakist obrobky v umovakh rozmirnoi obrobky metaliv elektrychnoi duhoiu / V. I. Nosulenko, V. M. Shmelov, A. A. Pashchenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser. : Innovatsiini tekhnologii ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii = Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – № 11 (1336). – S. 53-57.
5. Krainiuk Ye.V., Olhinskyi A.H. Vmist vazhkykh i toksychnykh metaliv u gruntі / Ye.V. Krainiuk, A.H.Olhinskyi // Liudyna i dovkillia. 2002. - Vypusk 3. - S.26-31.
6. Horbenko V. V. Problemy ta perspektyvy kompleksnoi utylizatsii vidkhdov elektroeroziinoi obrobky, shcho mistiat nikel, na pidpriemstvakh Kharkivskoho rehionu / V. V. Horbenko, L. P. Hurenko, I. O. Vynnyk // Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI»: zb. nauk. tr. Temat. vyp. : Khimiia, khimichna tekhnologii ta ekolohiia. - Kharkiv: NTU "KhPI". – 2004. – № 38. – S. 68-72. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32531>
7. Domin D. O. Mozhylyvosti zaminy ferosplaviv, shcho zastosovuiutsia dlia lehuвання chavunu, kompleksnoiu prysadkoiu na osnovi nikeliu / D. O. Domin, V. V. Horbenko, I. O. Vynnyk // Protsesy lyttia. - 2002. - № 1. - S. 24-27.
8. Horbenko V. V. Otrymannia kompleksnykh lehuiuchykh dobavok z vidkhdov, shcho mistiat nikel, pislia elektroeroziinoi obrobky detalei / V. V. Horbenko, I. O. Vynnyk // Problemy mekhaniky hirnycho-metalurhiinoho kompleksu: materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf., r. Dnipropetrovsk, 28-31 travnia 2002 r. - Dnipropetrovsk: NHU, 2002. - S.106-109.
9. Mezentsev S. M. Shliakhy otrymannia ferosplaviv iz vidkhdov mashynobudivnykh pidpriemstv [Elektronnyi resurs] / S. M. Mezentsev, O. I. Ponomarenko, I. O. Mezentseva, N. S. Yevtushenko // Lytvo. Metalurhiia. 2024 : materialy 20-yi Yuvileinoi Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 28-30 travnia 2024 r. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t" [ta in.] ; zah. red. O. I. Ponomarenko. – Elektron. tekst. danі. – Kharkiv ; Kyiv, 2024. – S. 160-162.
10. Sokolov, V.M. Processing the Ni- And Cr-bearing oxidized scarfing granulates with liquid cast iron / Sokolov, V.M., Gorbenko, V.V., Vinnik, I.A., Mekhed, O.M. // TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium, 2006, 1, p. 453–462.
11. Mezentsev S.M. Osoblyvosti lehuвання chavuniv ta stalei vidkhdamy mashynobudivnykh pidpriemstv / S. M. Mezentsev, O.I. Ponomarenko, N.S. Yevtushenko, I.O. Mezentseva // Lytvo. Metalurhiia. 2023 [Elektronnyi resurs] : materialy 19-yi, 12-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 10-12 zhovtnia 2023 r. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t" [ta in.] ; zah. red. O. I. Ponomarenko. – Elektron. tekst. danі. – Kharkiv ; Kyiv, 2023. – S. 135-137.
12. Mezentseva I. O. Obrobka ridkoho chavunu vidkhdamy, shcho mistiat nikel / I. O. Mezentseva, V. V. Horbenko // Skhidnoevropeyskyi zhurnalпередoviykh tekhnologii = Eastern-European journal of enterprise technologies. - 2011. - № 3/1. - 59-63 s.
13. Ceritbinmez, F., & Kanca, E. (2021). The Effects of Cutting Parameters on the Kerf and Surface Roughness on the Electrode in Electro Erosion Process. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 9(2), 335-346. <https://doi.org/10.29109/gujsc.913417>
14. Abdugarimov, E.T., Mirkarimov, A.S. & Zaripov, A.A. Electroerosion treatment of dielectric materials. Surf. Engin. Appl.Electrochem. 43, 77–82 (2007). <https://doi.org/10.3103/S1068375507020019>
15. Holovko L. F. Elektroeroziina obrobka fasynykh otvoriv mnozhynnym rozriadom [Elektronnyi resurs]/L. F. Holovko, O. Z. Chumachenko // Metal ta lyttia Ukrainy. - 2013. - № 3. - S. 33-37. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2013_3_8
16. Shcherba A.A., Podiltsev A.D., Kucheriava I.M. Doslidzhennia elektroeroziinykh yavyshech pry protikanni impulsnoho strumu mizh strumoprovodnymy hranulamy z urakhuvanniam plazmovoho kontaktnoho promizhku // Tekhnichna elektrodynamika. - 2002. - №4. - S. 3–7.
17. Symonov V.K., Hryshyn O.M., Ivashchenko V.P. Rozrakhunky z teorii protsesiv vidnovlennia / Navchalnyi posibnyk.- Dnipropetrovsk: NMetAU. 2006.-48s.https://nmetau.edu.ua/file/simonov_raschety_po_vosstanovleniyu.2006.pdf
18. Teoriia metalurhiinykh protsesiv / V.B. Okhotskyi, O.L. Kostolov, V.K. Symonov ta in.-K.:ІЗМН, 1997.-512с. <https://www.twirpx.com/file/1749107>

Надійшла (received) 08.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мезенцева Ірина Олександрівна (Mezentseva Iryna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки

праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7695-7982>; e-mail: Iryna.Mezentseva@khpi.edu.ua.

Мезенцев Сергій Миколайович (Mezentsev Serhii) – аспірант кафедри ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4914-6614>; e-mail: Serhii.Mezentsev@mit.khpi.edu.ua.

*І. Е. ЯКОВЕНКО, О. А. ПЕРМЯКОВ, Д. Г. МУЗИЧКА, В. І. ГОРБУЛИК***ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РЕВЕРСИВНОГО ІНЖИНІРИНГУ В МАШИНОБУДІВНІЙ ГАЛУЗІ**

Анотація. Досліджено стан, динаміку та тенденції підприємств, що займаються наданням послуг у галузі технічного обслуговування, ремонту та відновлення машин. Визначено характер та особливості відмов, що призводять до втрати здатності машини виконувати своє функціональне призначення. Виділено три основні методи організації ремонтних робіт, які визначають принципи організації підприємства з ремонту та технічного обслуговування. В рамках дослідження розглянуто особливості розвитку сфери технічного обслуговування та ремонту у різних економічних регіонах, у тому числі України. У ході дослідження було проаналізовано статистичні дані функціонування підприємств технічного обслуговування та ремонту за останні 10-12 років, виявлено основні закономірності їх зміни, визначено основні фактори, що вплинули на цей процес. Встановлено, що основна частка виконуваних робіт припадає на промислове обладнання, транспортні засоби, будівельну та сільськогосподарську техніку. Причому спостерігається стабільне зростання затребуваності послуг, пов'язаних із обслуговуванням та відновленням обладнання (у середньому від 2% до 7,5% на рік, залежно від економічного розвитку країни). Особливу увагу приділено тенденціям у галузі реверсивного інжинірингу, що становить до 20% усіх ремонтних робіт. При цьому відновлення деталей найчастіше здійснюється за відсутності з різних причин конструкторсько-технологічної документації необхідної для її виготовлення, що потребує певної оснащеності та спеціалізації підприємства. Виділено основні фактори, які визначають постійно зростаючу потребу у такому вигляді послуг. Наголошено, що розвиток сучасних комп'ютерних технологій та засобів вимірювань відкривають нові можливості для розвитку підприємств, які займаються реверсивним інжинірингом.

Ключові слова: відмова обладнання; ремонт; відновлення; 3D моделювання; адитивна обробка; субтрактивна обробка; цифровізація

*I. YAKOVENKO, O. PERMYAKOV, D. MUZYCHKA, V. GORBULYK***PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF REVERSE ENGINEERING IN THE MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY**

Abstract. The state, dynamics and trends of enterprises engaged in the provision of services in the field of technical maintenance, repair and restoration of machines have been studied. The nature and features of failures that lead to the loss of the machine's ability to perform its functional purpose have been determined. Three main methods of organizing repair work have been identified, which define the principles of organizing a repair and maintenance enterprise. The study examined the characteristics of technical maintenance and repair development in various economic regions, including Ukraine. During the study, statistical data on the functioning of technical maintenance and repair enterprises over the past 10-12 years were analyzed, the main patterns of their change were identified, and the main factors that influenced this process were identified. It was established that the main share of the work performed falls on industrial equipment, vehicles, construction and agricultural machinery. Moreover, there is a stable growth in the demand for services related to the maintenance and restoration of equipment (on average from 2% to 7.5% per year, depending on the economic development of the country). Particular attention is paid to trends in the field of reverse engineering, which accounts for up to 20% of all repair work. At the same time, the restoration of parts is most often carried out in the absence, for various reasons, of the design and technological documentation necessary for their manufacture, which requires a certain level of equipment and specialization of the enterprise. The main factors that determine the constantly growing need for this type of service are highlighted. It is emphasized that the development of modern computer technologies and measuring instruments opens up new opportunities for the development of enterprises engaged in reverse engineering.

Keywords: equipment failure; repair; restoration; 3D modeling; additive manufacturing; subtractive manufacturing; digitalization

Вступ

Необхідність ремонту та обслуговування з'явилася у житті людей одночасно з виникненням машин та буде затребувана протягом усього життєвого циклу як людини, так і обладнання. Така необхідність впливає безпосередньо з визначення машини. Машина - технічний пристрій, що виконує механічні рухи для перетворення енергії, матеріалів та інформації. Більш сучасне визначення свідчить «Машиною є технічний об'єкт, що з взаємопов'язаних функціональних елементів (деталей, вузлів, пристроїв, механізмів та інших.), використовує енергію до виконання покладених на нею функцій» [1]. У цій роботі розглядаються питання, пов'язані з обслуговуванням, ремонтом, відновленням та модернізацією певного класу машин, а саме, енергетичних та робочих машин, тобто тих машин, які мають у своєму складі рухливі елементи. Будь-які деталі, елементи, вузли в процесі свого переміщення один щодо одного схильні до зносу, поломки, що призводить до порушення працездатності машини, і виникає необхідність ремонту для відновлення функціонального її призначення.

Таким чином, будь-яка машина вимагає комплекс операцій для підтримки справногo стану або працездатності об'єкта при застосуванні його за призначенням, зберігання і транспортування (технічне обслуговування) і комплекс операцій з відновлення справногo стану або працездатності об'єкта і відновлення його ресурсу або його складових (ремонт) [2].

Як показав аналіз основні причини відмови та незапланованих простоїв обладнання виникають при експлуатації обладнання та при його неналежному обслуговуванні (сумарно до 65%) [3] (рис.1).

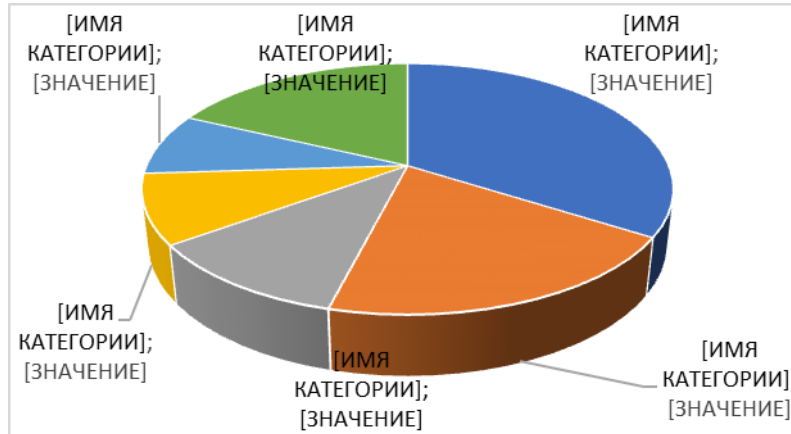


Рис. 1 – Типи відмов обладнання

Все це потребує ремонтно-відновлювальних робіт. Завдяки науковим досягненням концепції «Індустрії 4.0» у галузі сканування, цифровізації інформації та моделювання різних об'єктів машинобудування поряд із традиційними методами ремонту швидко розвивається так званий реверсивний інжиніринг (зворотне проектування, reverse engineering). Загальні концепції реверсивного інжинірингу з урахуванням CAD систем були закладені в [4]. Далі ці положення були розвинені в [5] з урахуванням досягнень в області комп'ютерної техніки та інформаційних технологій того часу. Ця робота послужила основою багатьом публікаціям присвяченим різним аспектам реверсивного інжинірингу від огляду характеристик обладнання для сканування об'єктів та програмних систем зі створення тривимірних моделей до розробки загальної концепції процесу реверсивного інжинірингу для різних галузей [6].

Автори вважають необхідним статистично підтвердити інтуїтивне розуміння значної ролі реверсивного інжинірингу в сучасних умовах, а також оцінити тенденції та перспективи розвитку цього напрямку у машинобудівній галузі України.

Мета дослідження.

Метою даної роботи є комплексне дослідження існуючих та прогнозування майбутніх тенденцій машинобудівних підприємств, які орієнтовані на технічне обслуговування, ремонт та експлуатацію (MRO - Maintenance, Repair, Operations - за міжнародною класифікацією) машин та обладнання, а також тенденції використання реверсивного інжинірингу щодо впровадження у виробничий процес технологічних інновацій та набуття цими підприємствами конкурентних переваг в умовах концепції «Індустрія 4.0».

Постановка завдання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання :

- проаналізувати статистичні дані обсягу робіт машинобудівних підприємств, які виконують функції MRO у світі, Європі та Україні протягом останніх 10-12 років;
- встановити частку робіт з реверсивного інжинірингу у загальному обсязі робіт пов'язаних з MRO;
- встановити основні закономірності змін та встановити основні фактори, що впливають на зміну статистичних показників ;
- запропонувати рекомендації щодо зниження негативу факторів, які впливають на розвиток таких підприємств;
- запропонувати рекомендації щодо впровадження сучасних техніко - технологічних інновацій та інших складових концепції Індустрії 4.0 у процеси створення та підтримки працездатності підприємств з метою отримання ними певних конкурентних переваг.

Методика дослідження.

Методика досліджень базується на статистичному аналізі та математичному моделюванні різних даних щодо підприємств, які спеціалізуються на ремонтно-відновлювальних роботах (у тому числі і роботи з використанням реверсивного інжинірингу) та об'єкти, для яких ці роботи виконувались. У ході дослідження використовуються дані про світовий, європейський та регіональні ринки з ремонту техніки та обслуговування обладнання в різних галузях машинобудування, а також матеріали, які присвячені методам реверсивного

інжинірингу. Увага приділяється аналізу динаміки зростання, факторів впливу, основних драйверів та бар'єрів подальшого розвитку цього сегменту.

Виклад основного матеріалу.

При проведенні аналізу ми зіткнулися з тим, що практично всі статистичні дослідження не поділяють промислові підприємства по поняттям технічного обслуговування, ремонту та відновлення (капітального ремонту) і використовують загальне поняття MRO (в деяких дослідженнях - Maintenance, Repair, Overhaul). З іншого боку, різні дослідницькі організації використовували різні підходи при включенні підприємств до цієї групи, тому статистичні дані, наведені у звітах різних компаній, дещо відрізняються. Проте, аналізуючи загальну картину для машинобудівної галузі, ми постаралися вибудувати загальну тенденцію і окремо виділити питання, пов'язані безпосередньо з відновленням деталей, вузлів, агрегатів на основі реверсивного інжинірингу.

Ремонтні роботи у машинобудівній галузі можна умовно розділити на три групи залежно від цього, ким і як ці роботи виконуються (рис.2).

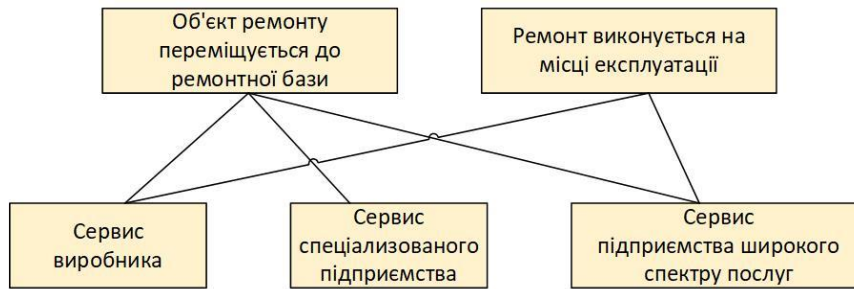


Рис. 2 – Методи організації ремонтних робіт

Перша група - це безпосередньо підприємства-виробники або їх сертифіковані представники з надання послуг MRO. У цьому випадку ремонт, відновлення або модернізація виробів найчастіше здійснюється безпосередньо на підприємстві за рахунок резерву деталей безпосередньо зі складу виробника або за рахунок виготовлення виробником оригінальних деталей за існуючою конструкторсько-технологічною документацією. У цьому випадку у застосуванні реверсивної технології немає необхідності (рис.3).

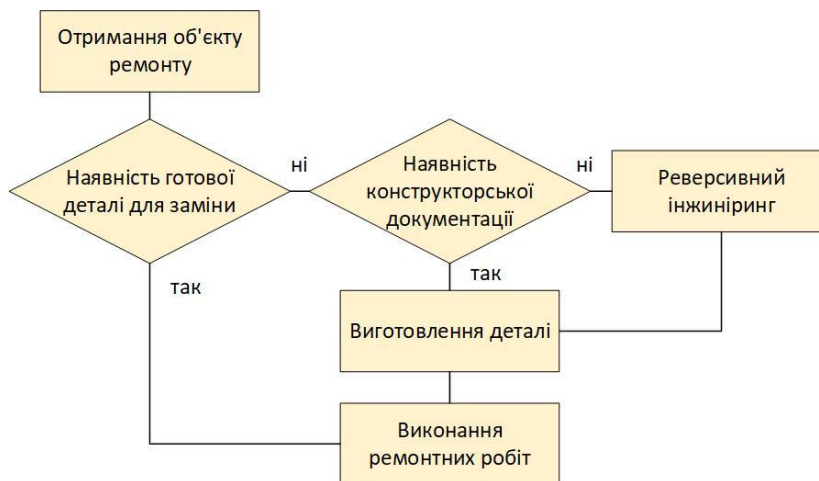


Рис. 3 – Загальна послідовність виконання ремонтних робіт

Друга група - це підприємства, які спеціалізуються на ремонті та відновленні конкретної групи виробів (наприклад, авторемонтні підприємства з ремонту автомобілів та аналогічної техніки). У цьому випадку заміна елементів здійснюється за оригінальними деталями або замовленими у інших виробників аналогами за погодженням із замовником. За наявності відповідних виробничих потужностей, може виготовлятися неоригінальна деталь за наявними кресленнями, технічними вимогами та технологією виготовлення. В окремих випадках такі підприємства використовують реверсивний інжиніринг для отримання конструкторсько-технологічної документації.

Третя група - це підприємства, які спеціалізуються на відновленні деталей та елементів різного призначення. Причому в більшості випадків відсутня конструкторська документація, технологія і технічні вимоги для виготовлення деталі, що вийшла з ладу. Виготовлення таких деталей здійснюється після виконання операцій реверсивного інжинірингу. Зазвичай ремонтні роботи у цьому випадку складаються з кількох етапів: аналіз об'єкта обробки, реверсивний інжиніринг та виготовлення деталі здійснюється на спеціалізованому підприємстві, а встановлення деталі та загальний монтаж виробу зазвичай здійснюється безпосередньо на

підприємстві замовника. У деяких випадках, коли об'єкт ремонту неможливо або недоцільно демонтувати та доставляти на спеціалізоване підприємство (наприклад, турбіни електростанцій, гірнична техніка та ін.) аналіз об'єкта обробки та сканування об'єкта виконується безпосередньо на місці експлуатації машини чи агрегату. В залежності від складності проекту реверсивний інжиніринг в даному випадку може виконуватись виїзною бригадою співробітників спеціалізованого підприємства безпосередньо на місці експлуатації об'єкту або на об'єкті виконуються тільки підготовчі роботи зі сканування та попередньої розробки 3D моделі, а вже остаточно модель та необхідна документація формується на підприємстві з використанням спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення (див. рис.2).

Однією з тенденцій сучасного машинобудування є зростання сектора, пов'язаного з ремонтом, модернізацією та відновленням виробів. Особливо це притаманно до сегментів машинобудівного виробництва «важких» і «великих» виробів переважно промислового і транспортного устаткування. Так, обсяг світового ринку MRO у 2021 р. становив 630 млрд USD з прогнозом 700,8 млрд на 2025 і зростання до 779 млрд USD у 2030 р. (CAGR 2,33-2,4%) [7].

У найбільш розвинених країнах Європи, США та Японії спостерігається стабільне зростання ремонту та обслуговування машинобудівної продукції, причому в основному на базі аутсорсингу (у 2024 році цей показник біля 40% зі зростанням до 45% у 2030) [8]. Близько 88% підприємств у розвинених країнах віддають більше 23% робіт з ремонту та технічного обслуговування машинобудівного обладнання спеціалізованим компаніям [9]. Причому, основна частка обсягу таких робіт припадає на МСП, які завдяки своєю гнучкості та швидкості переозброєння, дозволяють вирішувати поставлені завдання у найкоротші терміни.

Такий підхід обумовлений тим, що сучасні ремонтні технології вимагають достатньо високого рівня автоматизації підготовчих процесів (сканування пошкоджених деталей, їх наступне моделювання та корекція, використання оригінальних технологій відновлення, спеціального обладнання та ін.). Тому економічно більше вигідно звернутися за відновленням деталей та проведенням ремонтних робіт у спеціалізовану компанію з кваліфікованим персоналом, ніж містити штат ремонтників та обладнання, яке не може бути повністю завантажено безпосередньо на підприємстві.

У країнах, що розвиваються, ринок ремонтних робіт постійно розширюється за рахунок збільшення в експлуатації кількості машин та обладнання (в основному яке вже використовувалось і зношеного в різній ступень) та необхідності підтримувати це обладнання в робочому стані.

У глобальному масштабі динаміка обсягів ремонтних робіт у машинобудуванні та суміжних галузях (електроніка, машини та обладнання) також не є предметом регулярної публікації у вигляді окремих статистичних досліджень. Більшість міжнародних організацій, які займаються збором та організацією статистичних досліджень та публікують свої звіти (з зразка OECD, Eurostat, Statista), ведуть спостереження за загальним виробництвом машинобудування, обсягами сервісу/ремонту разом із послугами на ринку сервісу обладнання - MRO. Однак в цих звітах підкреслюється, що частка ремонту у загальному обсязі робіт з MRO у цих дослідженнях займає домінуюче становище [9].

На рисунку 4 наведено усереднені за останні 20 років частки різних сегментів машинобудування у виконуваному обсязі ремонтних робіт.

Найбільший обсяг ремонтних робіт (62-70%) посідає промислове обладнання, транспорт, будівельна і сільськогосподарська техніка. Ремонт електроустаткування складає близько 10-15%. Частка ремонту промислової електроніки та оптичного обладнання (приладобудівні галузі) становить близько 10%, проте є дуже важливим компонентом у високотехнологічному секторі економіки (дорогоє медичне обладнання, інформаційні системи, системи контролю, системи зв'язку та ін.) і тому тенденції зниження частки цього сектора не спостерігається. Ремонт побутової техніки, електроніки, недорогих приладів займає найменшу частку до 6%, і ця частка постійно зменшується з 10% у 2005 році.



Рис. 4 – Обсяг ремонтних робіт по галузям

Такий розподіл пов'язаний насамперед із тим, що термін служби виробів сегменту досить дорогого промислового обладнання значно перевищує термін служби побутової техніки та електроніки, особливо з погляду морального старіння та вартості. Це пояснюється все більшою швидкістю впровадження досягнень науково-технічного прогресу в цих галузях (поява нових функцій, покращення технічних характеристик та ергономічності тощо) при відносно невисокою вартості самих виробів.

Європейські компанії генерують понад 30% глобального світового MRO-ринку за обсягами [8]. В цьому сегменті в Європі задіяні як глобальні корпорації, так і безліч середніх і малих підприємств. Європейський Союз на рівні політики підтримує розвиток ремануфактури (remanufacturing – повторення виробничого циклу виготовлення на основі оригінальних специфікацій продукту з використанням відремонтованих або нових деталей), що є близьким до реверсивного інжинірингу напрямом дуже популярної зараз циркулярної економіки, тому ми не будемо розділяти ці параметри у статистичних дослідженнях стосовно Європи. Якщо розглядати обсяг товарообігу ремонтних робіт з усіх галузей у країнах Європи, то спостерігається регулярне лінійне зростання товарообігу в середньому на 4-8% на рік із просіданням під час світової економічної кризи 2008-2009р.р. та пандемії COVID -19 2020р. (близько 7-10%), з досягненням \$360 млрд обороту у 2030 році [7]. Як видно з графіку (рис.5) у 2021 році спостерігається більше різке відновлення та подальше рівне зростання товарообігу ремонтних робіт, що пов'язано в першу чергу із затримками поставок нової техніки та відсутністю належного обслуговування обладнання за період пандемії.

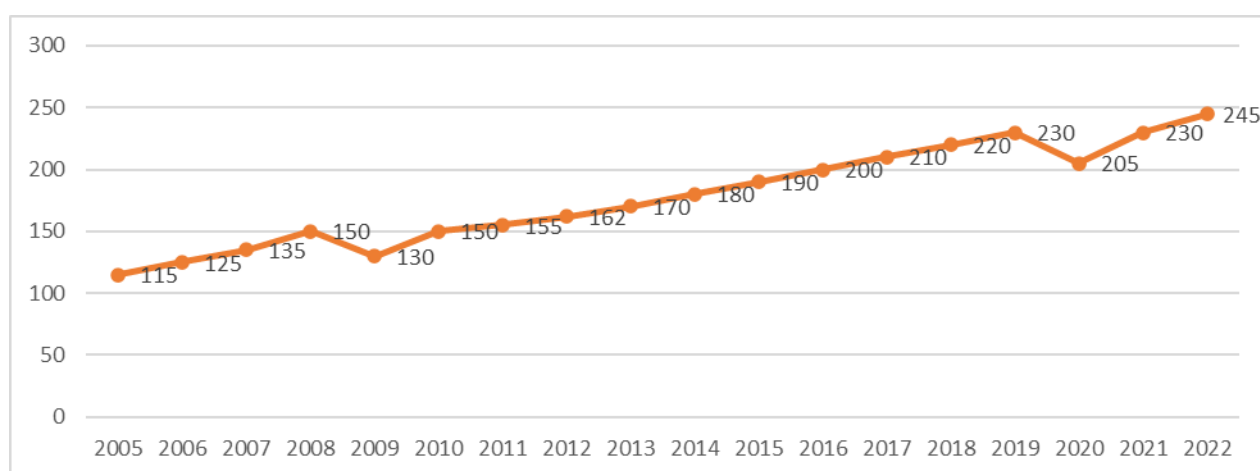


Рис. 5 –Товарообіг ремонтних робіт у машинобудівних галузях Європи, млрд. євро

За даними [10] ці показники дещо нижчі за 125,3 млрд.євро у 2022 році з приростом CAGR 3,8% на рік за період 2017-2022 років. Очікується, що товарообіг досягне 141,53 млрд євро до 2030 року при середньорічному темпі зростання 2,05% протягом прогнозованого періоду (2025-2030 роки). Таку відмінність можна пояснити тим, що до цього звіту увійшли лише країни Європейського Союзу з розвинутою економікою, до яких таке

зростання трохи нижче, ніж для країн з економікою, що розвивається. А також це пов'язано з включенням до статистичних даних товарообігу підприємств, які виконують не лише роботи пов'язані з MRO.

Розвиток MRO в Україні приблизно відповідає світовим тенденціям, і, на жаль, відносить нас до країн, що розвиваються, з широким споживанням техніки, що вже була у використанні. За офіційною статистикою, обсяг реалізованої продукції в сегменті ремонту і монтажу машин та обладнання у другій половині 2010-х зростав стійкими темпами – з близько 43,7 млрд грн у 2016 році до 78,2 млрд грн у 2020 році [11], у тому числі, за оцінками експертів, біля 20% індустріального ремонту пов'язано із застосуванням реверсивного інжинірингу (особливо у військово-промисловому, енергетичному та транспортному секторах), коли відсутня можливість купити оригінальні деталі та немає необхідної документації. У 2022 році спостерігався спад обсягу робіт внаслідок війни, але, згідно з Мінекономікою, у 2023 році витрати знову почали зростати через масштабне відновлення інфраструктури та військової техніки [12]. Так, наприклад, за даними Укрзалізниці та Міненерго, після 2022 року близько 35% усіх робіт із відновлення залізничного парку включали елементи, виготовлені на основі реверсивного інжинірингу (сканування, 3D-друк, заміщення імпортованих запчастин). Тобто, тенденції використання реверсивного інжинірингу в Україні відповідають світовим, або трохи вище.

Проте, реальна потреба в реверсивному інжинірингу в Україні значно вища через різні фактори (необхідність відновлення та підтримки у робочому стані застарілої та зруйнованої внаслідок війни критичної інфраструктури, ремонт військової та сільськогосподарської техніки, транспорту та ін.). Однак використання основних компонентів реверсивного інжинірингу - адитивних технологій, обладнання для високоточного сканування та створення 3D моделей нижче, ніж у середньому по Європі через його відносно високу вартість та обмежений доступ до сучасних ресурсів.

Реверсивний інжиніринг як окремий сегмент інженерних послуг набув поширення в різних галузях протягом останніх двох десятиліть. Обсяги робіт з реверсивного інжинірингу важко оцінити в грошовому виразі, оскільки значна частина виконується внутрішньо на підприємствах (наприклад, виготовлення запасної частини для власного обладнання). Втім, з'явився і комерційний ринок послуг реверс-інжинірингу – спеціалізовані фірми, що на замовлення оцифровують деталі та створюють інженерну документацію, а іноді і виробляють деталі. В даний час частка робіт із застосуванням реверсивного інжинірингу становить 15-20% від загального обсягу ремонтних робіт, особливо у високотехнологічних областях. За оцінками, світовий ринок послуг реверсивного інжинірингу становив приблизно \$1,5 млрд у 2024 році з прогнозом зростання до \$3,2 млрд у 2033 році (близько 9% на рік) [13]. За оцінками аналітиків з різних джерел, ринок реверсивного інжинірингу зростатиме темпами від 9% [13] до 12–16% щорічно і до 2030 року очікується подвоєння обсягів виконання робіт [14]. Причому його частка може досягати 30-40% на підприємствах із морально застарілим обладнанням чи імпортованою технікою, де немає доступу до документації чи запчастин [8]. Проте на сучасних автоматизованих виробництвах частка реверсивного інжинірингу знижується до 5–10% [15].

Виклики війни спричинили необхідність ще активнішого відновлення техніки, тому надалі очікується попит на технології реверсивного інжинірингу для відбудови промисловості. Уже зараз в Україні з'являються ініціативи з цифровізації інженерії: наприклад, волонтерські проекти 3D-сканування уламків техніки для виготовлення нових деталей, співпраця з європейськими виробниками 3D-обладнання (компанія “Artec 3D” заявила про підтримку України своїми 3D-сканерами для відновлення об'єктів) тощо.

Таким чином, як показав аналіз, основними факторами, що сприяють зростанню ринку реверсивного інжинірингу є:

1. Скорочення життєвого циклу обладнання для промислово розвинених країн сприяє його перетіканню на підприємства в країні Європи, Африки та Азії з економікою, що розвивається. Це вимагає виконання додаткових робіт по ремонту для відновлення функціональності такого обладнання.
2. Виробники оригінальних запчастин зі зняттям виробів із виробництва часто припиняють постачання їх окремих вузлів і деталей, що збільшує попит на відтворення деталей для ремонту, найчастіше за відсутності необхідної документації.
3. Впровадження наукових досягнень, що постійно вдосконалюються, в області 3D сканування, моделювання, адитивних та субтрактивних технологій дозволяють створювати копії складних деталей будь-якої форми, роблять процеси реверсивного інжинірингу швидкими, точними та масово доступними, прискорюючи ремонт та модернізацію обладнання.
4. Реверсивний інжиніринг дає можливість не тільки відтворити вихідну деталь, але й провести аналіз пошкоджень та виявити її конструктивні недоліки для коректного відновлення або поліпшення конструкції, що особливо важливо при запуску виробів в експлуатацію.
5. Зростання інтересу до ретроспективної техніки, коли відновлення її комерційного вигляду та працездатності можливе лише з використанням елементів реверсивного інжинірингу.

Висновки

1. Ринок ремонту та реверсивного інжинірингу за останні 10–15 років демонструє стабільний ріст у світі та Європі, зумовлений як економічними чинниками (прагнення максимально використати ресурс наявної техніки, знизити витрати), так і технологічними здобутками (цифровізація інжинірингу, 3D-друк, прогнозне обслуговування). Україна, попри спад традиційного

машинобудування, також розвиває цей напрям – потреба підтримувати працездатність інфраструктури й техніки робить ремонтно-інжинірингові послуги стратегічно важливими.

2. Зростання частки реверсивного інжинірингу в загальному обсязі ремонтно-відновлювальних робіт дозволяє виділити послуги з зворотного проектування або реверсивного інжинірингу в окремий комерційний напрям для інжинірингових та сервісних компаній. Це веде до появи нових бізнес-моделей у секторі технічного обслуговування, ремонту та модернізації, а також до збільшення частки аутсорсингу при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт. Для галузей, які використовують високотехнологічне, унікальне або дороге обладнання, реверсивний інжиніринг може стати стандартною частиною сервісного обслуговування.

3. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій і цифровізація виробничих процесів відкриває нові широкі можливості для організації реверсивного інжинірингу пошкоджених або зношених деталей, особливо в тих випадках, коли немає доступу або втрачена конструкторська документація. В цьому випадку використовують 3D моделі створені на основі комп'ютерних технологій отримання та обробки графічної інформації. Але для впровадження цих моделей потрібно виконати підготовку виробництва, тобто розробити конструкторську та технологічну документацію для подальшого використання у виробничому процесі. Тому питання підвищення точності та якості таких моделей є актуальними.

4. Реверсивний інжиніринг із вузької інженерної практики перетворився на масове явище, усі підприємства від великих до малих беруть його на озброєння. Як показав аналіз в наступні роки ця тенденція збережеться: підтримка працездатності існуючих машин і ефективне відтворення деталей залишатимуться важливою складовою машинобудівного бізнесу у всьому світі. Це є шляхом до сталого, економічного та швидкого інжинірингу майбутнього, де нові вироби народжуються не тільки на креслярській дошці, а й через аналіз та вдосконалення старих.

Список літератури:

1. The American Heritage Dictionary, Second College Edition. Houghton Mifflin Co., 1985.
2. ДСТУ 9050:2020 СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУВАННЯ ТЕХНІКИ Терміни та визначення зрозуміти. URL: <http://uas.org.ua> (дата звернення: 24.04.2025)
3. The maintenance function, як manufacturing itself, is a rapidly changing environment URL: <https://www.plantengineering.com/the-maintenance-function-like-manufacturing-itself-is-a-rapidly-changing-environment> (дата звернення: 24.04.2025)
4. Abella RJ, Daschbach JM, McNichols RJ Reverse engineering industrial applications (1994) Computers and Industrial Engineering, 26 (2), pp. 381 - 385 DOI: 10.1016/0360-8352 (94) 90071-X
5. Raja V., Fernandes KJ Reverse Engineering : An Industrial Perspective. (2008) Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 1 – 239
6. Пермяков О.О., Яковенко І.Є., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П. : зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 91–99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2 (8).10.
7. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share & Trends Analysis Report By MRO Type (Industrial MRO, Electrical MRO, Facility MRO, Other MRO Types) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2022-2030. URL: <https://straitresearch.com/report/maintenance-repair-and-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025)
8. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share, Trends and Forecast by Provider, MRO Type, and Region, 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/maintenance-repair-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025)
9. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (дата звернення: 24.04.2025)
10. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (дата звернення: 24.04.2025)
11. Промисловість України у 2016–2020 роках статистичний збірник Industry of Ukraine / За ред.І. ПЕТРЕНКО. Державна служба статистики України, 2021. – 296с.
12. Держстат України – Розділ 30.10, 2023 URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/fin/osp/orps/orps_u/arch_orps_u.htm (дата звернення: 24.04.2025)
13. Reverse Engineering Service Market Overview. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/reverse-engineering-service-market> (дата звернення: 24.04.2025)
14. Power Plant Maintenance Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Power Plant Type, by Services, by Equipments : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031 URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/power-plant-maintenance-market-A47448> (дата звернення: 24.04.2025)
15. Aircraft Engine MRO Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Platform (Commercial and Civil Aircraft (Narrow Body, Wide Body, Regional Aircraft, Business Jet, Trainers and Turboprops, and Commercial Helicopters) and Military Aircraft (Multirole and Combat, Military Transport Aircraft, Military Trainers, and Military

Helicopters), By Component (Compressor, Combustor, Nozzle, Fan Blades, Sensors, Actuators, and Others), By Engine Type (Piston Engine and Turbo Engine (Turbo Shaft, Turbo Prop, Turbo Fan, and Turbo Jet), and Regional Forecast, 2023-2030 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/aircraft-engine-mro-market-108858> (дата звернення: 24.04.2025)

Bibliography (transliterated):

1. The American Heritage Dictionary, Second College Edition. Houghton Mifflin Co., 1985.
2. DSTU 9050:2020 SYSTEMA TEKHNIČNOHO OBSLUHOVUVANNYA TA REMONTUVANNYA TEKHNIKY Terminy ta vyznachennya zrozumity. URL: <http://uas.org.ua> (data zvernennya: 24.04.2025)
3. The maintenance function, як manufacturing itself, is a rapidly changing environment URL: <https://www.plantengineering.com/the-maintenance-function-like-manufacturing-itself-is-a-rapidly-changing-environment> (last access: 24.04.2025)
4. Abella RJ, Daschbach JM, McNichols RJ Reverse engineering industrial applications (1994) Computers and Industrial Engineering, 26 (2), pp. 381 - 385 DOI: 10.1016/0360-8352 (94) 90071-X
5. Raja V., Fernandes KJ Reverse Engineering : An Industrial Perspective. (2008) Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 1 – 239
6. Permyakov O.O., Yakovenko I.Ye., Kalinichenko V.A., Skiba O.S., Yuzhkovich P. : zb. nauk.pr. / Nac. tehn. un-t «Harkiv. politehn. in-t». – Harkiv: NTU «HPI», 2023. № 2 (8) 2023. – S. 91–99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2 (8).10.
7. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share & Trends Analysis Report By MRO Type (Industrial MRO, Electrical MRO, Facility MRO, Other MRO Types) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2022-2030. URL: <https://straitresearch.com/report/maintenance-repair-and-operations-market> (last access: 24.04.2025)
8. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share, Trends and Forecast by Provider, MRO Type, and Region, 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/maintenance-repair-operations-market> (last access: 24.04.2025)
9. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (last access: 24.04.2025)
10. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (last access: 24.04.2025)
11. Promisloviť ukrajini u 2016–2020 rokah statističnij zbirnik Industry of Ukraine / Za red.I. PETRENKO. Derzhavna sluzhba statistiki Ukrajini, 2021. – 296s.
12. Derzhstat Ukrajini – Rozdil 30.10, 2023 URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/fin/osp/orps/orps_u/arch_orps_u.htm (data zvernennya: 24.04.2025)
13. Reverse Engineering Service Market Overview. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/reverse-engineering-service-market> (last access: 24.04.2025)
14. Power Plant Maintenance Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Power Plant Type, by Services, by Equipments : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031 URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/power-plant-maintenance-market-A47448> (last access: 24.04.2025)
15. Aircraft Engine MRO Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Platform (Commercial and Civil Aircraft (Narrow Body, Wide Body, Regional Aircraft, Business Jet, Trainers and Turboprops, and Commercial Helicopters) and Military Aircraft (Multirole and Combat, Military Transport Aircraft, Military Trainers, and Military Helicopters), By Component (Compressor, Combustor, Nozzle, Fan Blades, Sensors, Actuators, and Others), By Engine Type (Piston Engine and Turbo Engine (Turbo Shaft, Turbo Prop, Turbo Fan, and Turbo Jet), and Regional Forecast, 2023-2030 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/aircraft-engine-mro-market-108858> (last access: 24.04.2025)

Надійшла (received) 08.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) – кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X.

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194.

Музичка Діана Геннадіївна (Muzychka Diana) – доцент, к.т.н, доцент кафедри машинобудівних технологій Дніпровського державного технічного університету, м. Кам'янське, Дніпропетровської області Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine; Scopus ID: 57205359480,

Моб. 0677676234, diana_m@i.ua, ORCID: 0000-0002-2914-9672

Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr) – кандидат технічних наук,, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E_mail gorbulic@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, Р. Є. СТРИЛЕЦЬ

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО ДРУКУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Проведено математичний аналіз результатів експериментального дослідження відхилення розмірів базових шарів в залежності від технологічних параметрів як час експонування базових шарів, товщина базових шарів та кількість базових шарів за допомогою регресійного аналізу. В результаті дослідження надруковано 27 тестових моделей з різними технологічними параметрами для визначення впливу окремих параметрів на відхилення розмірів. В результаті аналізу визначено, що два параметри мають значний вплив на відхилення розмірів, це параметри час експонування та кількість базових шарів а один параметр – товщина базового шару не має значного впливу на результат друку. Визначення впливу технологічних параметрів на показники якості моделі дозволить скоротити процес підготовки деталі до друку і оптимізувати процес друку.

Ключові слова: 3D-друк, стеріолітографія, фотополімер, LCD, DLP, SLA, показники якості деталей, дефекти.

I. NEVLIUDOV, R. STRELETS

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PHOTOPOLYMER PRINTING ON THE QUALITY INDICATORS OF PARTS

A mathematical analysis of the experimental study results was conducted to investigate the dimensional deviations of base layers depending on such technological parameters as exposure time of the base layers, thickness of the base layers, and the number of base layers using regression analysis. As part of the study, 27 test models with varying technological parameters were printed to determine the influence of individual parameters on dimensional deviations. The analysis revealed that two parameters significantly affect dimensional deviations: exposure time and the number of base layers. In contrast, the thickness of the base layer does not have a significant impact on the printing outcome. Identifying the influence of technological parameters on the quality indicators of the model will help reduce the part preparation time for printing and optimize the printing process itself.

Keywords: 3D printing, stereolithography, photopolymer, LCD, DLP, SLA, quality indicators of parts, defects.

1. Вступ. На сьогодні одним з головних завдань у фотополімерному друці є оптимізація самого процесу та скорочення витрат часу на визначення технологічних параметрів через велику кількість різноманітних принтерів з різною конструкцією та різних за фізико-хімічними властивостями фотополімерами, показники якого впливають на технологічні параметри друку, на що витрачається значна трудомісткість. Таким чином необхідно оптимізувати технологічний процес підготовки деталі до друку та самого друку деталі. Це можливо зробити визначивши вплив всіх основних технологічних параметрів, на вихідні показники якості. Для визначення цього впливу проведено експериментальні дослідження, які полягають в друці 27 тестових моделей і в подальшому аналізі за допомогою регресійного аналізу.

2. Мета дослідження. Визначити вплив окремих технологічних факторів на показники якості деталі надрукованих за технологією стеріолітографії за допомогою математичного аналізу у вигляді нелінійної багатофакторної регресії.

3. Викладання основного матеріалу та результати. Для контролю параметрів якості деталей необхідно визначити вплив основних технологічних параметрів на кількісні показники відхилень дефектів. Таким чином, для першого дослідження взято відхилення розмірів базових шарів від заданих у моделі в залежності від трьох параметрів, які найбільше можуть впливати на отриманий результат: товщина базових шарів, час експонування базових шарів та кількість базових шарів.

Для проведення експерименту зроблено просту 3D-модель, яка має форму куба з розмірами 20x20x5 з товщиною стінки 4 мм. Розміри даної моделі вибрані враховуючи мінімізацію використання фотополімеру та отримання результатів з мінімальною похибкою. Розмір вимірюваних шарів по вертикалі буде складатися від 0.1 до 0.9 мм, так як для дослідження взято кількість базових шарів від 2 до 6 з товщиною від 50 до 150 мкм. Час експонування взято враховуючи властивості фотополімерного принтера, зокрема наявність в ньому монохромного екрану, що зменшує час експонування в 3-5 разів у порівнянні зі повнокольоровими екранами а також досвіду друку, що визначило мінімально можливий час експонування для конкретної смоли та принтера та при якому модель залишається на платформі.

Модель для проведення дослідження зображена на рисунку 1.

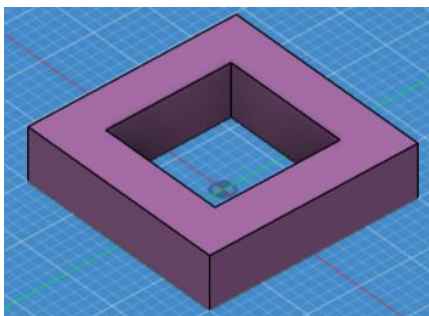


Рис. 1 – Тестова модель для дослідження відхилення базових шарів від звичайних

© І. Ш. Невлюдов, Р. Є. Стрілець, 2025

Таким чином для проведення багатофакторного регресійного аналізу взято три фактори: час експонування базових шарів, товщина базових шарів та їх кількість. В результаті проведення експериментальних досліджень у вигляді друку тестових моделей отримано значення відхилення базових шарів, які виміряні за допомогою спеціального вимірювального пристрою: штангенциркуля, що має похибку до 5 мкм(рис. 2).



Рис. 2– Вимірювання розмірів відхилення базових шарів

В результаті друку тестової моделі з різними параметрами отримано 27 моделей (рис. 3).



Рис. 3 – Отримані моделі в результаті друку

Числові значення факторів та отриманих результатів зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати друку тестових моделей в залежності від технологічних параметрів

| № | Час експонування базових шарів, сек | Товщина базового шару, мкм | Кількість базових шарів, шт | Відхилення розмірів базових шарів, мм |
|----|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 16,00 | 50,00 | 2,00 | 0,42 |
| 2 | 23,00 | 50,00 | 2,00 | 0,76 |
| 3 | 30,00 | 50,00 | 2,00 | 0,88 |
| 4 | 16,00 | 100,00 | 2,00 | 0,50 |
| 5 | 23,00 | 100,00 | 2,00 | 0,84 |
| 6 | 30,00 | 100,00 | 2,00 | 0,87 |
| 7 | 16,00 | 150,00 | 2,00 | 0,54 |
| 8 | 23,00 | 150,00 | 2,00 | 0,72 |
| 9 | 30,00 | 150,00 | 2,00 | 0,86 |
| 10 | 16,00 | 50,00 | 4,00 | 0,60 |
| 11 | 23,00 | 50,00 | 4,00 | 0,78 |
| 12 | 30,00 | 50,00 | 4,00 | 0,93 |
| 13 | 16,00 | 100,00 | 4,00 | 0,65 |
| 14 | 23,00 | 100,00 | 4,00 | 0,84 |
| 15 | 30,00 | 100,00 | 4,00 | 1,00 |
| 16 | 16,00 | 150,00 | 4,00 | 0,60 |
| 17 | 23,00 | 150,00 | 4,00 | 0,76 |
| 18 | 30,00 | 150,00 | 4,00 | 1,00 |
| 19 | 16,00 | 50,00 | 6,00 | 0,55 |
| 20 | 23,00 | 50,00 | 6,00 | 0,61 |
| 21 | 30,00 | 50,00 | 6,00 | 0,84 |
| 22 | 16,00 | 100,00 | 6,00 | 0,73 |
| 23 | 23,00 | 100,00 | 6,00 | 0,90 |
| 24 | 30,00 | 100,00 | 6,00 | 0,93 |
| 25 | 16,00 | 150,00 | 6,00 | 0,75 |
| 26 | 23,00 | 150,00 | 6,00 | 0,96 |
| 27 | 30,00 | 150,00 | 6,00 | 1,20 |

Як видно з таблиці 1 в якості значень для фактору час експонування взято три значення 16, 23 та 30 секунд. Для товщини шару взято 50, 100, та 150.

Для кількості базових шарів взято 2, 4 та 6 шарів.

В подальшому ці фактори отримали позначення час експонування – а, товщина базового шару – b та кількість шарів – с. Розміри відхилення отримали позначення d. Всі значення зведено в таблицю 2.

Таблиця 2 – Прийняті позначення

| Фактори | Час експонування базових шарів, сек | Товщина базових шарів, мкм | Кількість базових шарів, шт | Відхилення від заданих розмірів, мм |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Позначення | a | b | c | d |
| Позначення МФЕ | x_1 | x_2 | x_3 | y |
| Верхній ліміт(1) | 30 | 150 | 6 | - |
| Основний рівень | 23 | 100 | 4 | - |
| Нижній ліміт(-1) | 16 | 50 | 2 | - |

Матриця проведення багатфакторного регресійного аналізу відображена в таблиці 3.

Таблиця 3 – Матриця проведення багатofакторного регресійного аналізу

| Номер експеримента | a | b | c | x1 | x2 | x3 | x1*x2 | x1*x3 | x2*x3 | x1*x2*x3 | x1*x1 | x2*x2 | x3*x3 | y |
|--------------------|----|--------|------|----|----|----|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 16 | 50,00 | 2,00 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,42 |
| 2 | 23 | 50,00 | 2,00 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,76 |
| 3 | 30 | 50,00 | 2,00 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,88 |
| 4 | 16 | 100,00 | 2,00 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,50 |
| 5 | 23 | 100,00 | 2,00 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,84 |
| 6 | 30 | 100,00 | 2,00 | 1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,87 |
| 7 | 16 | 150,00 | 2,00 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,54 |
| 8 | 23 | 150,00 | 2,00 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,72 |
| 9 | 30 | 150,00 | 2,00 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,86 |
| 10 | 16 | 50,00 | 4,00 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,60 |
| 11 | 23 | 50,00 | 4,00 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,78 |
| 12 | 30 | 50,00 | 4,00 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,93 |
| 13 | 16 | 100,00 | 4,00 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,65 |
| 14 | 23 | 100,00 | 4,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,84 |
| 15 | 30 | 100,00 | 4,00 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1,00 |
| 16 | 16 | 150,00 | 4,00 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,60 |
| 17 | 23 | 150,00 | 4,00 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,76 |
| 18 | 30 | 150,00 | 4,00 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1,00 |
| 19 | 16 | 50,00 | 6,00 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,55 |
| 20 | 23 | 50,00 | 6,00 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,61 |
| 21 | 30 | 50,00 | 6,00 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,84 |
| 22 | 16 | 100,00 | 6,00 | -1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,73 |
| 23 | 23 | 100,00 | 6,00 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,90 |
| 24 | 30 | 100,00 | 6,00 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,93 |
| 25 | 16 | 150,00 | 6,00 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,75 |
| 26 | 23 | 150,00 | 6,00 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,96 |
| 27 | 30 | 150,00 | 6,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,20 |

Основне рівняння багатofакторної регресії має наступний вигляд:

$$\tilde{y}_i = a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_mx_{mi} + b \quad (1)$$

Для визначення коефіцієнта регресії використовується наступна формула:

$$b_i = \frac{\sum_1^n (y_i \cdot x_i)}{n}, \quad (2)$$

де: b_i – коефіцієнт регресії;
 n – кількість проведених дослідів;
 y_i – значення функції y ;
 x_i – значення фактору.

Таким чином отримано виходячи з матриці проведення експерименту 10 коефіцієнтів регресії, що зведені до таблиці 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії

| Коефіцієнт регресії | Значення |
|---------------------|--------------|
| b_1 | 0,117407407 |
| b_2 | 0,037777778 |
| b_3 | 0,04 |
| b_4 | 0,003333333 |
| b_5 | -0,007777778 |
| b_6 | 0,095185185 |
| b_7 | 0,011111111 |
| b_8 | 0,512962963 |
| b_9 | 0,50962963 |
| b_{10} | 0,513333333 |
| b_0 | 0,78 |

Перші три коефіцієнта відповідають за лінійну частину регресійного аналізу, b_4 - b_7 відповідають за парну взаємодію між факторами, b_8 - b_{10} відповідають за квадратичні ефекти взаємодії між факторами, b_0 – нульовий коефіцієнт регресії.

Загальне рівняння регресії буде мати наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.11x_1 + 0.037x_2 + 0.04x_3 + 0.0033x_1x_2 - 0.0077x_1x_3 + 0.095x_2x_3 + 0.011x_1x_2x_3 + 0.51x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.51x_3^2 \quad (3)$$

Далі необхідно перевірити коефіцієнти регресії по критерію Стьюдента. Для цього визначено дисперсію залишків, яка становить 0.05.

Після визначення дисперсії була виконана перевірка значущості коефіцієнтів за допомогою t-тесту по критерію Стьюденту. Формула t-тесту має наступну форму:

$$t_i = \frac{b_i}{SE(b_i)}, \quad (4)$$

де $SE(b_i)$ – стандартна помилка коефіцієнта, яка розраховується з дисперсії залишків.

В результаті отримано таблицю 5 з результатами розрахунку T-тесту для кожного коефіцієнту:

Таблиця 5 – Результат розрахунку t-тесту для кожного коефіцієнта регресії

| | |
|-----|--------------|
| t0 | 3,857404884 |
| t1 | 1,497988576 |
| t2 | 0,849726096 |
| t3 | 0,874360939 |
| t4 | 0,252406262 |
| t5 | -0,016582278 |
| t6 | 1,348793399 |
| t7 | 0,460828678 |
| t8 | 3,131149161 |
| t9 | 3,120959171 |
| t10 | 3,132279336 |

Для подальшої перевірки отриманих тестів для кожного коефіцієнта взято табличне значення коефіцієнта Стьюдента з використанням довірчої ймовірності 0.95 та з числом ступенів свободи 26, що становить 2.055.

В результаті лише три коефіцієнта відповідають умовам та більше за табличний коефіцієнт. Ці коефіцієнти зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 6 – Коефіцієнти Стьюдента, що більші за табличний коефіцієнт 2.055.

| | |
|-----|-------|
| t0 | 3,857 |
| t8 | 3,131 |
| t9 | 3,12 |
| t10 | 3,132 |

Ці коефіцієнти Стьюдента відповідають коефіцієнтам регресії, які також зведені в таблицю 7.

Таблиця 7 – Значущі коефіцієнти регресії

| | |
|-----------------|-------|
| b0 | 0.78 |
| b ₈ | 0.513 |
| b ₉ | 0.509 |
| b ₁₀ | 0.513 |

Тоді загальне рівняння регресії з урахуванням значущих коефіцієнтів буде мати наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.513x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.513x_3^2 \quad (5)$$

В подальшому розрахунки

виконані в спеціальному ПЗ Statistica. Отримано коефіцієнти детермінації та кореляції(табл. 8), які свідчать про те, що зв'язок між множинами в рівнянні регресії має лінійний зв'язок.

Таблиця 8 – Результат розрахунків коефіцієнтів кореляції та уточненого коефіцієнта кореляції

| Summary Statistics; DV: | |
|-------------------------|--------------------|
| Statistic | Value |
| Multiple R | 0,908904741 |
| Multiple R ² | 0,826107827 |
| Adjusted R ² | 0,794491069 |
| F(4,22) | 26,1287957 |
| p | 0,0000000443455868 |
| Std.Err. of Estimate | 0,0813444478 |

Виходячи з таблиці квадрат коефіцієнта множинної кореляції становить 0.908, що є більшим за 0.7, яке відповідає критерію Фішера, тобто можна вважати, що варіація обумовлена впливом факторів.

Далі можливо проаналізувати залишки, які отримані в ПЗ Statistica. Для перевірки залишків на наявність автокореляції розраховано статистику Дарбіна-Уотсона, що зображено на рисунку 4.

| Durbin-Watson d (Аркуш3 in 1) and serial correlation of residuals | | |
|---|-----------------|--------------|
| | Durbin-Watson d | Serial Corr. |
| Estimate | 1,425372 | 0,233044 |

Рис. 4 – Розраховане значення статистики Дарбіна-Уотсона

Таким чином значення становить 1,425 при $n=27$ та $k=3$, тоді табличне значення значущих точок для 5% рівня значущості $d_l=1,16$ а $d_u=1,65$. Таким чином, значення отримане в результаті розрахунків 1,425 є меншим ніж значення d_u , яке становить 1,65, тоді можливо зазначити, що в моделі є автокореляція залишків. подальшому отримано декілька графіків залишків.

Для оцінки адекватності моделі побудували нормальний вірогідний графік залишків, що зображений на рисунку 5.

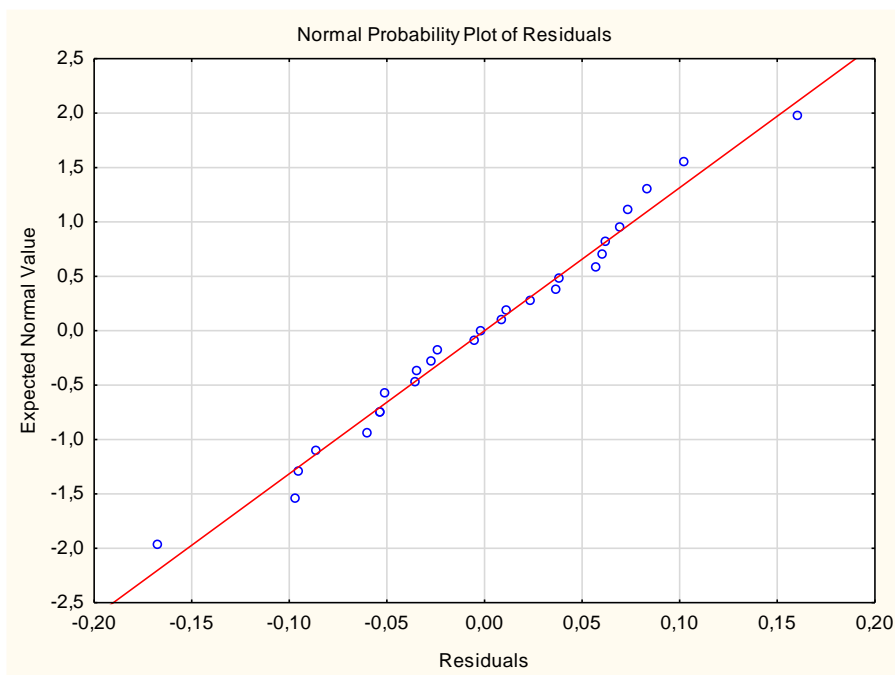


Рис. 5 – Нормальний вірогідний графік залишків

Із графіка видно, що залишки добре лягають на пряму, що відповідає нормальному закону розподілення.

Далі отриманий графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення залежної змінної для визначення нестабільності дисперсії похибки рівняння. Цей графік зображений на рисунку 6.

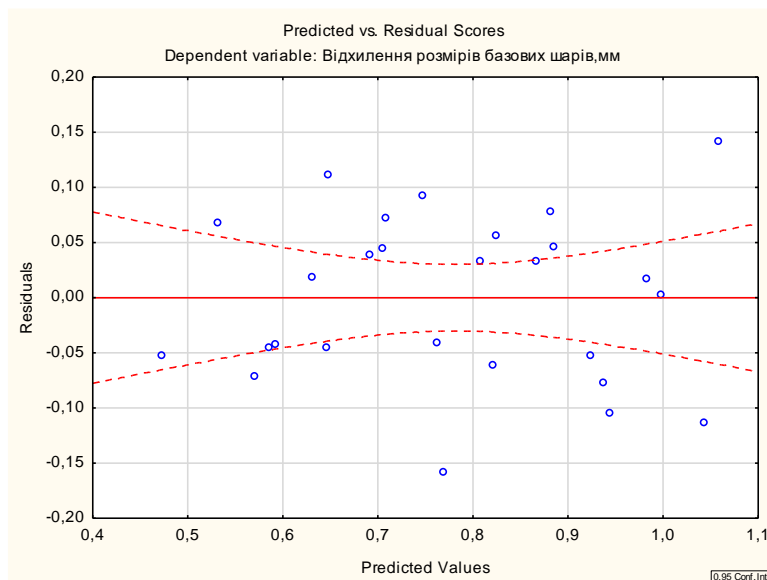


Рис. 6 – Графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення

На графіку можна побачити границю довірчого інтервалу та середнє значення залишків. Також можливо відзначити, що залишки не залежать від передбачених по рівнянню регресії значень відгуків та розкидані хаотично відносно прямої та між ними немає закономірності розподілу, таким чином модель адекватно описує вхідні дані.

Загальна гістограма залишків зображена на рисунку 7. В результаті аналізу цієї гістограми можливо визначити те, що вона є відносно симетричною, що свідчить про те, що залишки нормально розподілені.

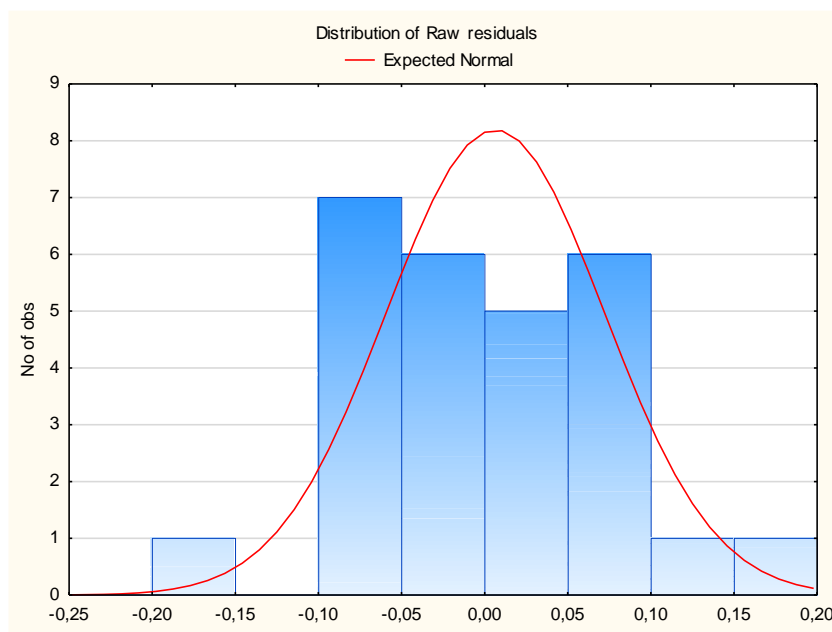


Рис. 7 – Загальна гістограма залишків

В результаті для визначення відносного впливу таких факторів як час експонування(а), товщина базових шарів(б) та кількість базових шарів(с) на розміри відхилення базових шарів розраховано за формулами:

$$r_a^2 = \frac{t_a^2 * R^2}{t_a^2 + t_b^2 + t_c^2}, \tag{6}$$

де: t_a – отримане раніше значення t-критерію для фактора часу експонування;

t_b – отримане раніше значення t-критерію для фактора товщини базових шарів;

t_c – отримане раніше значення t-критерію для фактора кількість базових шарів;

R^2 – коефіцієнт детермінації, який має значення 0.82.

Таким чином розраховано вплив по вищевказаній формулі і для інших факторів. В подальшому результат розрахунків зведені в таблицю 9.

Таблиця 9 – Значення відносного впливу факторів на розміри відхилення базових шарів

| r^2 | Значення |
|---------|----------|
| r_a^2 | 0,71543 |
| r_b^2 | 0,074071 |
| r_c^2 | 0,083042 |

В подальшому розраховано коефіцієнт еластичності, що показує на скільки відсотків зростає показник у при зростанні окремих факторів на 1%.

Формула для розрахунку коефіцієнта еластичності:

$$KE_n = a_n * \frac{x_n}{y} \quad (7)$$

В подальшому отримані значення зведені до таблиці 10.

Таблиця 10 – Коефіцієнти еластичності

| Фактор | KE, % |
|--------------------------------|----------|
| Час експонування базових шарів | 3,456565 |
| Товщина базових шарів | 4,752617 |
| Кількість базових шарів | 0,205519 |

В подальшому розраховано теоретичні значення підставляючи значення факторів в отримане рівняння регресії та зведено в таблицю 11.

Таблиця 11 – Зведена таблиця факторів, вихідної величини у практичного та отримане значення у теоретичного.

| Час експонування базових шарів, сек | Товщина базового шару, мкм | Кількість базових шарів, шт | Відхилення розмірів базових шарів, мм | Теоретичне відхилення розмірів базових шарів, мм |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| 16,00 | 50,00 | 2,00 | 0,42 | 0,485740741 |
| 23,00 | 50,00 | 2,00 | 0,76 | 0,661851852 |
| 30,00 | 50,00 | 2,00 | 0,88 | 0,837962963 |
| 16,00 | 100,00 | 2,00 | 0,50 | 0,542407407 |
| 23,00 | 100,00 | 2,00 | 0,84 | 0,718518519 |
| 30,00 | 100,00 | 2,00 | 0,87 | 0,89462963 |
| 16,00 | 150,00 | 2,00 | 0,54 | 0,599074074 |
| 23,00 | 150,00 | 2,00 | 0,72 | 0,775185185 |
| 30,00 | 150,00 | 2,00 | 0,86 | 0,951296296 |
| 16,00 | 50,00 | 4,00 | 0,60 | 0,545740741 |
| 23,00 | 50,00 | 4,00 | 0,78 | 0,721851852 |
| 30,00 | 50,00 | 4,00 | 0,93 | 0,897962963 |
| 16,00 | 100,00 | 4,00 | 0,65 | 0,602407407 |
| 23,00 | 100,00 | 4,00 | 0,84 | 0,778518519 |
| 30,00 | 100,00 | 4,00 | 1,00 | 0,95462963 |
| 16,00 | 150,00 | 4,00 | 0,60 | 0,659074074 |
| 23,00 | 150,00 | 4,00 | 0,76 | 0,835185185 |
| 30,00 | 150,00 | 4,00 | 1,00 | 1,01296296 |
| 16,00 | 50,00 | 6,00 | 0,55 | 0,605740741 |
| 23,00 | 50,00 | 6,00 | 0,61 | 0,781851852 |
| 30,00 | 50,00 | 6,00 | 0,84 | 0,957962963 |
| 16,00 | 100,00 | 6,00 | 0,73 | 0,662407407 |
| 23,00 | 100,00 | 6,00 | 0,90 | 0,838518519 |
| 30,00 | 100,00 | 6,00 | 0,93 | 1,01462963 |
| 16,00 | 150,00 | 6,00 | 0,75 | 0,719074074 |
| 23,00 | 150,00 | 6,00 | 0,96 | 0,895185185 |
| 30,00 | 150,00 | 6,00 | 1,20 | 1,071296296 |

Отримана діаграма зображена на рисунку 8. Вона показує відхилення прогнозованих значень вихідної величини від тих значень, що отримані в результаті проведення експерименту – друку тестових моделей. Відхилення значень становлять від 40 до 130 мкм.

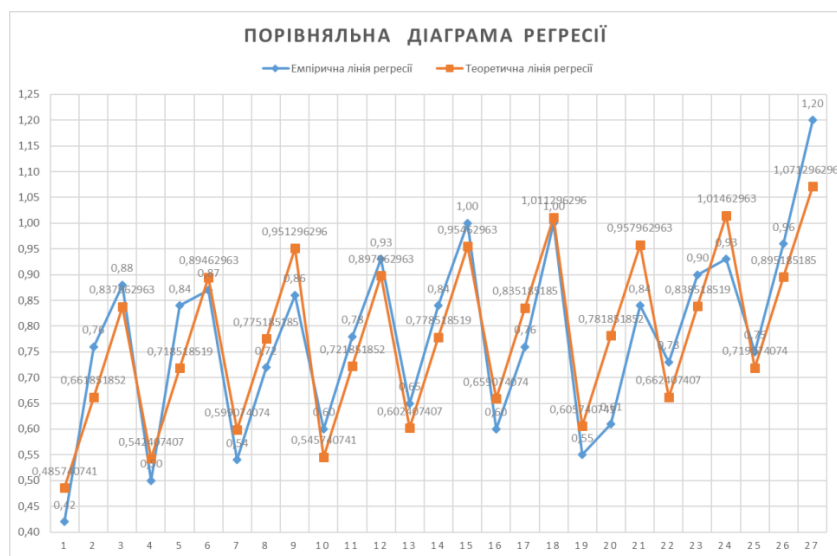


Рисунок 8 – Порівняльна діаграма регресії

Висновки. Таким чином, в результаті проведення експериментального дослідження з використанням регресійного аналізу встановлено, що найбільше на відхилення розмірів базових шарів впливають лише 2 фактори, такі як час експонування та кількість базових шарів, натомість товщина шару має найменший вплив на відхилення розмірів. Отримані результати являються основою для розробки технологічних процесів фотополімерного друку.

Список літератури:

1. Регресійний аналіз. URL: [https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_\(OpenStax\)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії\(дата_звернення:_09.01.2025\).](https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_(OpenStax)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії(дата_звернення:_09.01.2025).)
2. Основи кореляційного та регресійного аналізу. URL: https://pchilka-litsei.in.ua/excel-book/basis_analysis.html (дата звернення: 09.01.2025).
3. Метод регресійного аналізу в MS Excel. URL: <https://modeling.at.ua/publ/10-1-0-58>(дата звернення: 09.01.2025).
4. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близняк Д.С. Сравнительный анализ технологий 3D прототипирования SLA, DLP и LCD. Разработка автоматизированной станции для 3D печати. VII Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (НУХТ).2020 С. 55–56.
5. Igor Nevlyudov, Ievgenii Razumov-Fryziuk, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Boards. *Technology Audit and Production Reserves* № 2/2(64), 2022. P.43-49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538
6. I.Nevlyudov, E.Razumov-Fryzyuk, D.Nikitin, D.Bliznyuk, R.Strelets. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості* № 1 (15). 2021 С.120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>
7. Стереолітографія – що потрібно знати про технологію. URL: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/>(дата звернення: 09.01.2025).
8. Методи і техніка досліджень. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_10/page3.html(дата звернення: 09.01.2025).
9. Методологія і організація наукових досліджень URL: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzen.pdf (дата звернення: 09.01.2025).
10. Основи наукових досліджень. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>(дата звернення: 09.01.2025).

References (transliterated)

1. Regression analysis [Rehresiinyi analiz]: available at: [https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_\(OpenStax\)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії](https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_(OpenStax)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії) (last accessed: 28.05.2024).
2. Basics of correlation and regression analysis [Osnovy koreliatsiinoho ta rehresiinoho analizu]: available at: https://pchilka-litsei.in.ua/excel-book/basis_analysis.html (last accessed: 29.05.2024).
3. The method of regression analysis in MS Excel [Metod rehresiinoho analizu v MS Excel]: available at: <https://modeling.at.ua/publ/10-1-0-58> (last accessed: 29.05.2024).

4. Nikitin D.O., Strilets R.E., Blyzniuk D.S. "Porivnyalnyi analiz tekhnolohiyi 3D prototypyrovaniya SLA, DLP y LCD. Razrabotka avtomatyzyrovanoi stantsiyi dlia 3D pechaty" VII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna Internet-konferentsiia «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy» (NUKhT).2020 p.55–56.
5. Igor Nevlyudov, Ievgenii Razumov-Fryziuk, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets "Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Boards" Technology Audit and Production Reserves — № 2/2(64), 2022. P.43-49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538
6. I.Nevlyudov, E. Razumov-Fryzyuk, D. Nikitin, D. Bliznyuk, R. Strelets "Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3d masks" Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti № 1 (15). 2021 C.120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>
7. Stereolithography - what you need to know about the technology [Stereolitohrafiia – shcho potribno znaty pro tekhnolohiiu]: available at: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/> (last accessed: 29.05.2024).
8. Research methods and techniques [Metody i tekhnika doslidzhen]: available at: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_10/page3.html (last accessed: 29.05.2024).
9. Methodology and organization of scientific research [Metodolohiia i orhanizatsiia naukovykh doslidzhen]: available at: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzhen.pdf (last accessed: 29.05.2024).
10. Basics of the scientific research [Osnovy naukovykh doslidzhen]: available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf> (last accessed: 29.05.2024).

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович (Nevliudov Igor) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, м. Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Стрілець Роман Євгенійович (Strelets Roman) – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: roman.strilets@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-8703>

Ф. В. НОВІКОВ**УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ**

Розроблено математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Проведено оптимізацію геометричних параметрів переривчастих кругів за критерієм найменшої температури різання та встановлено, що за умови рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга досягається екстремум (мінімум) температури різання. Показано, що чим більше робочих виступів на переривчастому крузі, тим меншою може бути температура різання. Розрахунками встановлено, що за цих умов температуру різання під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3-х разів порівняно із звичайним шліфуванням суцільним кругом. Однак, для цього необхідно забезпечити повне або часткове охолодження оброблюваної деталі за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга. Інакше температура різання буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, що може привести до перевищення температури різання, яка досягається під час шліфування суцільним кругом. Встановлено, що найбільшу продуктивність обробки за заданої температури різання в умовах переривчастого шліфування можна досягти шляхом застосування методу глибинного шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. Це підтверджується практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти завдяки виникаючим незначним температурам різання, що дозволяє забезпечити високі показники якості та продуктивності обробки.

Ключові слова: процес різання, оброблюваний матеріал, адіабатичний стержень, охолодження, швидкість круга

F. V. NOVIKOV**REFINED CALCULATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING INTERMITTENT GRINDING**

A mathematical model for determining the cutting temperature during intermittent grinding has been developed and the conditions for its reduction have been substantiated, taking into account the balance of heat released during grinding and supplied to the chips and the workpiece. The geometric parameters of intermittent wheels have been optimized according to the criterion of the lowest cutting temperature and it has been established that, provided that the lengths of the working protrusion and the cutout of the intermittent wheel are equal, the extreme (minimum) of the cutting temperature is achieved. It has been shown that the more working protrusions there are on the intermittent wheel, the lower the cutting temperature can be. Calculations have established that under these conditions, the cutting temperature during intermittent grinding can be reduced by up to 3 times compared to conventional grinding with a solid wheel. However, for this it is necessary to ensure complete or partial cooling of the workpiece during the period of passage of the grinding zone by the cutout of the intermittent wheel. Otherwise, the cutting temperature will increase significantly as the number of contacts of the working protrusions of the intermittent wheel with the processed material increases, which can lead to an excess of the cutting temperature achieved during grinding with a solid wheel. It has been established that the highest processing performance at a given cutting temperature in intermittent grinding conditions can be achieved by using the deep grinding method with a relatively low speed of the part. This is confirmed by practical data obtained during cutting of blanks with intermittent wheels into parts with significant cutting depths (30 mm and more), in which, as a rule, there are no scorching and other temperature defects on the processed surfaces due to the arising insignificant cutting temperatures, which allows to ensure high indicators of quality and processing productivity.

Keywords: cutting process, processed material, adiabatic rod, cooling, wheel speed

Вступ Метод переривчастого шліфування отримав широке застосування у виробництві завдяки можливості зменшення температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки. Особливо ефективним є його застосування на операціях зубошліфування, де актуальною є проблема зменшення температури різання й виключення утворення температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Ефект переривчастого шліфування пов'язаний, по-перше, із високою ріжучою здатністю переривчастого круга, що досягається в результаті ударно-циклічної взаємодії робочих виступів круга із оброблюваним матеріалом (за суттю – це процес виправлення круга), по-друге, із періодичністю процесу різання та можливістю охолодження оброблюваного матеріалу в момент проходження вирізами переривчастого круга зони різання, що приводить до зменшення температури різання. Таким чином, ефект переривчастого шліфування досягається за двома напрямками, що позитивно відрізняє його від інших технологічних процесів механічної обробки та відкриває широкі перспективи подальшого розвитку. Підтвердженням цьому є те, що звичайні (суцільні) абразивні круги більш високої твердості, які у звичайних умовах шліфування фактично непрацездатні внаслідок інтенсивного засалювання робочої поверхні та втрати ріжучої здатності, в умовах переривчастого шліфування працюють стабільно у режимі рівномірного зношування та не вимагають їх додаткового виправлення, забезпечують високі показники якості та продуктивності обробки. Разом з тим, технологічні можливості переривчастого шліфування на практиці використовуються недостатньо повно, існують резерви підвищення його ефективності. Це вимагає подальшого дослідження фізичної сутності переривчастого шліфування та теоретичного визначення оптимальних умов обробки, що реалізують його потенційні технологічні можливості. Тому в даній роботі наведено результати теоретичних досліджень, що спрямовані на пошук нових напрямів підвищення ефективності переривчастого шліфування.

Аналіз основних досягнень та літератури. Основним досягненням у розвитку переривчастого шліфування є роботи професора Якимова О. В. [1–3], направлені на встановлення фізичних і технологічних закономірностей цього процесу та розроблення і впровадження у виробництва прогресивних технологій

переривчастого шліфування. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що пульсуюче нагрівання оброблюваної деталі із мікроскопічними інтервалами охолодження, завдяки періодичному перериванню контакту переривчастого круга із деталлю, дозволяє вилучити теплове насичення поверхневих шарів оброблюваного матеріалу і зменшити температуру різання та підвищити якість обробки. Показано, що періодичне переривання процесу шліфування також збуджує високочастотні коливання у пружній системі, зменшуючи, тим самим, енергоємність процесу та забезпечуючи безперервне правлення круга, що додатково приводить до зменшення температури різання. Отримані професором Якимовим О. В. результати досліджень стали основою створення теорії переривчастого шліфування та розрахунків температури різання. На основі цієї теорії встановлено шляхи зменшення температури різання під час переривчастого шліфування завдяки застосуванню абразивних високопористих кругів [4], алмазних кругів [5] та ефективних технологічних середовищ [6]. У роботах [7, 8] наведено розрахунки температури різання та геометричних характеристик кругів під час переривчастого шліфування. Однак ці роботи виконано, по-перше, без урахування балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі, по-друге, без урахування невиданого матеріалу, що накопичився за період переривання процесу шліфування, на значення температури різання. А це обмежує можливості теоретичного обґрунтування оптимальних параметрів процесу шліфування та характеристик переривчастих кругів. У роботі [9] наведено спрощену математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування, у якій враховано невиданий матеріал, що накопичився за період переривання процесу шліфування. Це дозволило більш точно підійти до аналітичного описання температури різання та оптимізації геометричних параметрів переривчастого круга. Тому важливо розробити уточнену математичну модель переривчастого шліфування із урахування також балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі, і на цій основі аналітично визначити температуру різання і оптимальні геометричні параметри переривчастих кругів.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є аналітичне визначення температури різання під час переривчастого шліфування з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування і надходить до стружок і оброблюваної деталі, та обґрунтування умов зменшення температури різання для створення ефективних високопродуктивних та високоякісних технологічних процесів переривчастого шліфування.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити математичну модель визначення температури різання під час переривчастого шліфування та провести оптимізацію геометричних параметрів переривчастих кругів за критерієм найменшої температури різання;
- виконати оцінювання отриманих результатів оптимізації та порівняти їх із відомими теоретичними і експериментально встановленими рішеннями щодо умов зменшення температури різання та підвищення ефективності переривчастого шліфування;
- провести порівняння умов зменшення температури різання під час переривчастого і звичайного шліфування та обґрунтувати переваги переривчастого шліфування;
- розробити практичні рекомендації щодо створення високоефективних технологічних процесів переривчастого шліфування.

Матеріали дослідження. Для досягнення поставленої мети слід застосувати наведену у роботі [10] уточнену аналітичну залежність для визначення температури різання θ під час шліфування суцільним кругом з урахуванням балансу тепла, яке виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі (рис. 1):

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pi3}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (1)$$

де $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальна температура різання, град. σ – умовне напруження різання, Н/м²; c – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·град); ρ – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·град); V_{pi3} – швидкість руху теплового джерела углуб поверхневого шару оброблюваного матеріалу, м/с; τ – час перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня, якими умовно представлено припуск, що знімається, с.

У розрахунковій схемі (рис. 1) враховано рух теплового джерела углуб поверхневого шару оброблюваного матеріалу, який відбувається з швидкістю V_{pi3} у результаті перерізання шліфувальним кругом адіабатичних стержнів, якими представлено припуск, що знімається [9, 11]. Параметр l_2 визначає глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, м; параметр l_1 – довжину зрізаної частини адіабатичного стержня, м. Запропонований теоретичний підхід дозволяє наблизити розрахункову схему температури різання до реальних умов шліфування, оскільки враховує баланс тепла, що виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Встановлено, що згідно із залежністю (1), розходження

розрахункових і експериментальних значень температури різання під час шліфування суцільним кругом складає не більше 12 % [10]. На відміну від традиційно встановлених аналітичних залежностей для визначення температури різання під час шліфування на основі рішення класичного диференційного рівняння теплопровідності матеріалів [12–14], наведена залежність (1) дозволяє встановити кінцеве значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі l_2 , тобто глибину дефектного шару обробленого матеріалу. Виходячи із цього, важливо застосувати залежність (1) для визначення температури різання θ під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення. Важливо також провести оптимізацію геометричних параметрів переривчастого круга за критерієм найменшої температури різання θ .

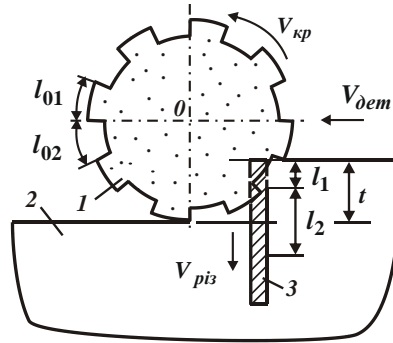


Рис. 1 – Розрахункова схема визначення температури різання під час плоского переривчастого шліфування: 1 – переривчастий шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень

Із залежності (1) випливає, що зменшити час τ і, відповідно, температуру різання θ можна застосуванням переривчастого шліфування. У цьому випадку час τ визначається часом контакту робочого виступу переривчастого круга з оброблюваною деталлю і його можна значно зменшити. Однак внаслідок наявності вирізу на переривчастому крузі робочий виступ повинен видалити додатково ще й невідалений матеріал, що накопився за період переривання процесу шліфування. Тому це призводить до збільшення швидкості $V_{різ}$. У результаті має місце більш складний екстремальний характер зміни температури різання θ . Для його розкриття розглянемо закономірності формування температури різання θ на протязі часу τ_{01} контакту робочого виступу переривчастого круга довжиною l_{01} із оброблюваним матеріалом. Тоді залежність (1) для визначення температури різання θ набуде вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{різ01}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}}, \quad (2)$$

де $V_{різ01}$ – швидкість перерізання адіабатичного стержня переривчастим кругом, м/с.

У цьому випадку часткове перерізання адіабатичного стержня переривчастим кругом (рис. 1) відбувається лише протягом часу контакту робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом τ_{01} , оскільки протягом часу τ_{02} проходження зони шліфування вирізом довжиною l_{02} переривчастий круг не контактує із адіабатичним стержнем [2]. У результаті за час τ_{01} відбудеться перерізання адіабатичного стержня довжиною

$$П = \tau_{01} \cdot V_{різ01}, \quad (3)$$

тобто видалення поверхневого шару оброблюваного матеріалу товщиною $П$.

За час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$ відбудеться перерізання адіабатичного стержня такої самої довжини $П$ суцільним кругом:

$$П = \tau_0 \cdot V_{різ}, \quad (4)$$

де $V_{різ}$ – швидкість перерізання адіабатичного стержня суцільним кругом, м/с.

Після порівняння залежностей (3) і (4), маємо:

$$V_{різ01} = \left(1 + \frac{\tau_{02}}{\tau_{01}}\right) \cdot V_{різ}. \quad (5)$$

Як видно, швидкість перерізання $V_{різ01}$ адіабатичного стержня переривчастим кругом більше швидкості перерізання $V_{різ}$ адіабатичного стержня суцільним кругом $V_{різ}$, що підтверджується експериментальними даними, наведеними в роботах [2, 3]. Підставляючи залежність (5) у залежність (2), отримано:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{кр}^2}{\lambda} \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)^2} \tag{6}$$

Із залежності (6) випливає, що зі збільшенням часу τ_{01} вираз $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$, що входить до правої частини залежності (6), а відповідно, і функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ змінюються за екстремальною залежністю. Це, наприклад, витікає із виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$, який отримано після нескладних перетворення виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$. Виходячи із рис. 2, вираз $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ приймає екстремальне (мінімальне) значення [9]. Отже, за умови досягнення екстремальних значень l_{01} і τ_{01} функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ і температура різання θ теж будуть приймати екстремальні значення.

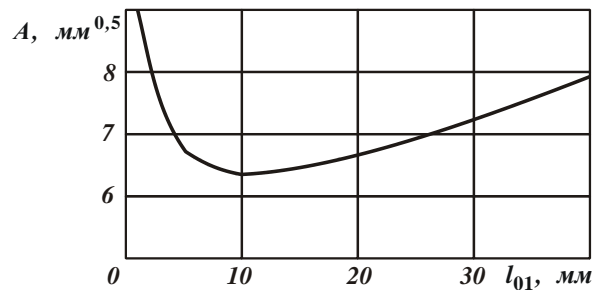


Рисунок 2 – Залежність значень виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ від довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01}

Для аналітичного визначення екстремальних значень часу τ_{01} і довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} підпорядкуємо вираз $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$ необхідній умові екстремуму, тобто візьмемо першу похідну від цього виразу за часом τ_{01} . Після нескладних математичних перетворень визначено екстремальне значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$. Із урахуванням відношень $\tau_{01} = l_{01} / V_{кр}$ та $\tau_{02} = l_{02} / V_{кр}$ це відповідає умові $l_{01} = l_{02}$, де $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с.

Розрахунками також встановлено, що друга похідна часу τ_{01} від виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$ за умови $\tau_{01} = \tau_{02}$ приймає позитивне рішення. Тому у точці екстремуму виразу $B = \left(\sqrt{\tau_{01}} + \frac{\tau_{02}}{\sqrt{\tau_{01}}}\right)$, а відповідно, і температури різання θ має місце мінімум, що відповідає розрахунковим даним, наведеним на рис. 2. Після підстановки екстремального значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$ у залежність (6) встановлено екстремальне (мінімальне) значення функції $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$, яке визначає мінімальне значення температури різання θ :

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{4 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{кр}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}} \tag{7}$$

Таким чином, аналітично встановлено, що під час переривчастого шліфування в залежності від відношення τ_{02}/τ_{01} та, відповідно, відношення l_{02}/l_{01} температура різання θ проходить точку мінімуму, яка досягається за умови рівності довжин робочого виступу l_{01} і вирізу l_{02} переривчастого круга, що співпадає із даними, наведеними в роботі [9].

Отже, використовуючи залежність (6), можна здійснювати розрахунки екстремальних значень параметрів теплового процесу під час переривчастого шліфування.

В умовах шліфування суцільним кругом за той же час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$, тобто за час одного контакту робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, залежність (2) набуває вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pi2}^2 \cdot \tau_0}{\lambda}}. \quad (8)$$

Із урахуванням екстремального значення часу $\tau_{01} = \tau_{02}$ маємо $\tau_0 = 2 \cdot \tau_{01}$. Тоді залежність (8), що визначає температуру різання θ під час шліфування суцільним кругом, приймає вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{pi2}^2 \cdot \tau_{01}}{\lambda}}. \quad (9)$$

Із порівняння залежностей (7) і (9) видно, що під час переривчастого шліфування функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ менше, а температура різання θ більше, ніж під час шліфування суцільним кругом. Це пов'язано із тим, що значення температури різання θ для двох випадків порівнюється у початковий час $\tau_0 = \tau_{01} + \tau_{02}$, тобто лише за один контакт робочого виступу переривчастого круга із оброблюваним матеріалом. Якщо за час проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга відбудеться повне охолодження оброблюваного матеріалу, то під час наступних контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом пікові значення температура різання θ не зміняться (рис. 3).

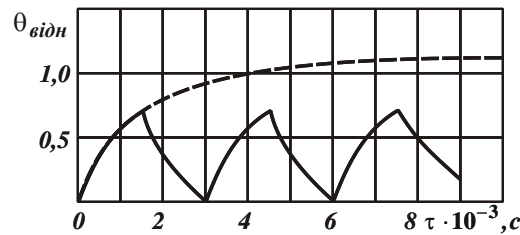


Рисунок 3– Розрахункові значення відносних температур різання $\theta_{відн}$ під час шліфування суцільним (контурна лінія) та переривчастим (суцільна лінія) кругами [2]

В умовах же шліфування суцільним кругом із часом обробки $\tau > \tau_0$ функція $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ буде зменшуватися, а температура різання θ , навпаки, буде безперервно збільшуватися (рис. 3). У результаті температура різання θ під час шліфування суцільним кругом буде перевищувати температуру різання θ під час шліфування переривчастим кругом [2]. Тому основною умовою зменшення температури різання θ під час переривчастого шліфування слід розглядати необхідність підтримання її максимального значення (пікового значення) на заданому рівні шляхом забезпечення повного або часткового охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга.

У іншому випадку, тобто за умов недостатнього охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга, температура різання θ буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом. Це не дозволить досягти ефекту від застосування переривчастого шліфування із точки зору зменшення температури різання.

Як показано в роботах професора Якимова О. В. [1–3], на практиці досягти умови повного охолодження оброблюваного матеріалу під час переривання контакту переривчастого шліфувального круга із оброблюваною деталлю і стабілізації в часі пікових значень температура різання θ (рис. 3) фактично неможливо. Вдається лише частково забезпечити охолодження оброблюваного матеріалу. Тому пікові значення температури різання θ не залишаються постійними в часі, а збільшуються, однак зі значно меншою інтенсивністю, чим інтенсивність збільшення температури різання θ в умовах шліфування суцільним кругом. Така закономірність

пов'язана із дуже незначним часом переривання процесу переривчастого шліфування, у результаті чого оброблюваний матеріал не встигає повністю охолоджуватися. Тому розглянемо умови зменшення температури різання θ .

Із залежності (7) випливає, що із урахуванням відношення $\tau_{01} = l_{01}/V_{кр}$ зменшити температуру різання θ під час шліфування переривчастим кругом можна зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} та збільшенням швидкості круга $V_{кр}$. Обмеженням зменшення довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} слід розглядати його міцність. Отже, зменшення величини l_{01} призводить до збільшення кількості робочих виступів і, відповідно, кількості вирізів на переривчастому крузі, що є важливим чинником зменшення температури різання θ під час переривчастого шліфування.

Важливо провести кількісне порівняння температури різання θ під час шліфування сталі ШХ15 суцільним і переривчастим кругами. Коефіцієнт теплопровідності сталі ШХ15 – $a = \lambda/(c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для цього у табл. 1 наведено розрахункові значення часу $\tau = l/V_{дем}$ (де $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$ – довжина дуги контакту круга із оброблюваною деталлю, м; t – глибина шліфування, м; $R_{кр}$ – радіус круга, м; $V_{дем}$ – швидкість деталі, м/с), за яких відбувається повне перерізання адіабатичного стержня в умовах шліфування суцільним кругом.

Таблиця 1 – Розрахункові значення часу τ для вихідних даних: $t=0,1$ мм; $R_{кр}=100$ мм

| $V_{дем}$, м/хв | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 30 |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| τ , с | 0,2683 | 0,1341 | 0,0537 | 0,02683 | 0,01341 | 0,00894 |

Для умов шліфування суцільним кругом температура різання θ визначається залежністю (1). У табл. 2 наведено розраховані за цією залежністю значення виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$. Для визначення часу τ із урахуванням отриманих значень виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$, встановлено значення $V_{різ}$ за залежністю (1) для вихідних даних: $V_{кр} = 30$ м/с; $t=0,1$ мм; $R_{кр} = 100$ мм. Розрахунками встановлено: $V_{різ} = 3,727$ мм/с. Виходячи із цього, у табл. 2 наведено розраховані значення часу τ на основі отриманих значень виразу $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$ для різних значень відношення θ/θ_{max} .

Порівняння значення часу $\tau=0,02683$ с для $V_{дем}=10$ м/хв (табл. 1) зі значеннями часу τ (табл. 2) показало, що відношення θ/θ_{max} змінюється у межах 0,2 ... 0,4. Тому для більш точного визначення відношення θ/θ_{max} для часу $\tau=0,02683$ с проведено розв'язання рівняння (1) відносно відношення θ/θ_{max} числовим методом. У результаті встановлено: $\theta/\theta_{max}=0,215$.

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу під час плоского шліфування для $V_{дем} = 10$ м/хв

| θ/θ_{max} | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1 |
|---|---|---------|--------|--------|--------|---------|----------|
| $e^{\theta/\theta_{max}}$ | 1 | 1,2214 | 1,4918 | 1,8221 | 2,2255 | 2,4596 | 2,7183 |
| $(1-\theta/\theta_{max}) \cdot e^{\theta/\theta_{max}}$ | 1 | 0,9771 | 0,8951 | 0,7288 | 0,4451 | 0,24596 | 0 |
| $V_{різ}^2 \cdot \tau/a$ | 0 | 0,02314 | 0,11 | 0,3163 | 0,81 | 1,4 | ∞ |
| τ , с (для $V_{різ} = 3,727 \cdot 10^{-3}$ м/с) | 0 | 0,014 | 0,0665 | 0,1913 | 0,4898 | 0,8466 | ∞ |

Для умов шліфування переривчастим кругом ($l_{01} = 20$ мм; $V_{кр} = 30$ м/с) температуру різання θ слід визначати залежністю (7) із урахуванням часу $\tau_{01} = l_{01}/V_{кр} = 0,63 \cdot 10^{-3}$ с. Після розв'язання рівняння (7) відносно відношення θ/θ_{max} числовим методом встановлено: $\theta/\theta_{max} = 0,07$. Це значення θ/θ_{max} менше значення $\theta/\theta_{max} = 0,215$, що отримано для умов шліфування суцільним кругом. Виходячи із цього, встановлено відношення температур різання під час шліфування переривчастим і суцільним кругами: $\theta_{перерив}/\theta_{суціль} = 0,07/0,215 = 0,325$. Як видно, застосування переривчастого шліфування дозволяє суттєво (до 3-х разів) зменшити температури різання θ . Однак, реальний ефект зменшення температури різання θ досягається, як

показано раніше, завдяки забезпеченню повного (або часткового) охолодження оброблюваного матеріалу за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга.

На основі залежності (7) можна встановити умови реалізації екстремуму (мінімуму) температури різання θ під час переривчастого шліфування. Для цього слід виразити швидкість V_{piz} залежністю:

$V_{piz} = V_{dem} \cdot \sqrt{t / 2R_{kp}}$, а час $\tau_{01} = l_{01} / V_{kp}$. Тоді залежність (7) прийме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{dem}^2 \cdot t \cdot l_{01}}{\lambda \cdot R_{kp} \cdot V_{kp}}} \tag{10}$$

або

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{dem} \cdot Q_{num} \cdot l_{01}}{\lambda \cdot R_{kp} \cdot V_{kp}}}, \tag{11}$$

де Q_{num} – питома продуктивність обробки, м²/с.

Як випливає із табл. 2, температура різання θ тим менше, чим менше показник ступеня експонентної функції ($V_{piz}^2 \cdot \tau / a$), що входить до правої частини залежності (2) і, відповідно, залежностей (10) і (11). Тому зменшити температуру різання θ під час плоского переривчастого шліфування за умови $Q_{num} = const$ можна зменшенням швидкості деталі V_{dem} та, відповідно, збільшенням глибини шліфування t , тобто застосуванням методу глибинного шліфування. Чим менше швидкість деталі V_{dem} , тим більше глибина шліфування t , і тим менше температура різання θ [9]. Це підтверджується також практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти. Це вказує на незначні температури різання, які виникають в процесі різання, та можливість забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки. Тому забезпечити суттєве збільшення питомої продуктивності обробки Q_{num} можна, головним чином, зменшенням швидкості деталі V_{dem} , збільшенням глибини шліфування t і швидкості круга V_{kp} .

Традиційно переривчасті круги застосовують в умовах багатопрхідного шліфування із відносно великими значеннями швидкості деталі V_{dem} та невеликими глибинами шліфування t . У цих умовах досягаються відносно невеликі значення питомої продуктивності обробки Q_{num} і температури різання θ , що забезпечують високу якість обробки, наприклад, на операціях зубошліфування [2]. Однак, при цьому температура різання θ зменшується лише в межах 50%, тоді як показано вище розрахунками температуру різання θ під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3 –х разів. Отже, в умовах багатопрхідного шліфування недостатньо використовуються потенційні можливості процесу переривчастого шліфування з точки зору продуктивності обробки, оскільки з переходом до умов глибинного шліфування можна значно підвищити продуктивність обробки без збільшення температури різання θ .

Із залежності (11) також випливає, що зменшити температура різання θ та збільшити питому продуктивність обробки Q_{num} можна зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} . Однак,

як встановлено розрахунками, вираз $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$, незначно збільшується після перевищення

екстремального значення $l_{01} = 6.32$ мм (табл. 3), а отже, незначно збільшується і температура різання θ . Тому на практиці довжину робочого виступу l_{01} , як правило, встановлюють більше довжини вирізу l_{02} на робочій поверхні переривчастого круга [1–3]. Це дозволяє значно зменшити зношування шліфувальних переривчастих кругів, особливо коштовних алмазних кругів, без значного збільшення температури різання θ .

Таблиця 3 – Розрахункові значення виразу $A = \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ за умови $l_{02} = 10$ мм

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| l_{01} , мм | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| A , мм ^{0,5} | ∞ | 6,71 | 6,32 | 6,46 | 6,71 | 7,0 | 7,3 | 7,6 | 7,9 |

Слід зазначити, що застосування переривчастих кругів, у яких $l_{01} < l_{02}$, неефективно, оскільки в цьому разі значно збільшується вираз A (табл. 3) і, відповідно, температура різання θ .

Зменшення довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} за екстремальної умови $l_{01} = l_{02}$ указує на можливість значного збільшення кількості робочих виступів на поверхні переривчастого круга. Це рішення також знаходить застосовують на практиці для зменшення температури різання θ .

Таким чином, на основі проведеного теоретичного аналізу можна в узагальненому вигляді сформулювати основні умови зменшення температури різання під час переривчастого шліфування. Вони полягають, по-перше, у збільшенні до певного значення кількості робочих виступів на переривчастому крузі, по-друге, у виконанні умови $l_{01} = l_{02}$. Аналогічне аналітичне рішення отримано в роботі [7]. На основі накопиченого практичного досвіду також рекомендується застосовувати умову $l_{01} = l_{02}$, що підтверджує достовірність отриманого теоретичного рішення [11].

Порівняно із шліфуванням суцільним кругом, ефективність переривчастого шліфування досягається завдяки значному зменшенню часу формування максимальної температури різання θ . Так, в процесі переривчастого шліфування цей час дорівнює τ_{01} , а в процесі шліфування суцільним кругом – часу перерізання шліфувальним кругом адиабатичного стержня $\tau = l/V_{dem} = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}} / V_{dem}$. Тоді відношення

$$\frac{\tau}{\tau_{01}} = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{V_{dem}} \cdot \frac{V_{кр}}{l_{01}} = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{l_{01}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{dem}}. \quad (12)$$

Як витікає із залежності (12), відношення $\tau/\tau_{01} > 1$, тому температура різання θ під час переривчастого шліфування менше, ніж під час шліфування суцільним кругом. В умовах глибинного шліфування (із незначною швидкістю деталі V_{dem} та збільшеною глибиною шліфування t) відношення τ/τ_{01} суттєво збільшується, що вказує на ефективність застосування переривчастого шліфування. Зі зменшенням довжини робочого виступу переривчастого круга l_{01} і збільшенням швидкості круга $V_{кр}$ також збільшується відношення τ/τ_{01} , що вказує на переваги переривчастого шліфування.

Висновки. У роботі отримано теоретичні рішення щодо аналітичного визначення температури різання під час переривчастого шліфування та обґрунтування умов її зменшення, які засновано на урахуванні балансу тепла, що виділяється в процесі шліфування та надходить до стружок і оброблюваної деталі. Проведено оптимізацію геометричних параметрів переривчастого круга за критерієм найменшої температури різання. Встановлено, що зі зміною довжини робочого виступу переривчастого круга температура різання змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму. Екстремум (мінімум) температури різання досягається за умови рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга. Показано, що чим більше робочих виступів на переривчастому крузі, тим меншою може бути температура різання. Розрахунками встановлено, що за цих умов температуру різання під час переривчастого шліфування можна зменшити до 3-х разів порівняно із звичайним шліфуванням суцільним кругом. Однак, для цього необхідно забезпечити повне або часткове охолодження оброблюваної деталі за період проходження зони шліфування вирізом переривчастого круга. Інакше температура різання буде значно збільшуватися у міру збільшення кількості контактів робочих виступів переривчастого круга із оброблюваним матеріалом, що може привести до перевищення температури різання, яка досягається під час шліфування суцільним кругом. Встановлено, що найбільшу продуктивність обробки за заданої температури різання в умовах переривчастого шліфування можна досягти шляхом застосування методу глибинного шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. Це підтверджується практичними даними, отриманими під час розрізання переривчастими кругами заготовок на частини із значними глибинами різання (30 мм і більше), за яких на оброблених поверхнях, як правило, відсутні припикання та інші температурні дефекти, що вказує на незначні температури різання, які виникають в процесі різання, та можливість забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки.

Список літератури:

1. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Юргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
2. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 175 с.
3. Якимов А. В. Прерывистое шлифование. Киев – Одесса: Изд. объедин. Вища школа, 1986. 175 с.
4. Kalashnikov A.S., Morgunov Y.A., Kalashnikov P.A., Filippov V.V. (2013). Features of intermittent profile grinding cylindrical gears. Izvestiya MGTU MAMI. Vol. 7. N. 1-2. P. 51-54.
5. Лаврінченко В. І. Надтверді матеріали в механообробці / В. І. Лаврінченко, М. В. Новіков; за ред. М. В. Новікова. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
6. Larshin, V. P., Lishchenko, N. V., Pitel, J. (2020). Intermittent grinding temperature modeling for grinding system state monitoring. Applied Aspects of Information Technology. Simulation of Physical Objects and Processes. 2020; Vol.3 No.2: 58–73.
7. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 166 с.
8. Снижение теплового фактора при плоском абразивном шлифовании / Тонконогий В., Якимов А., Бовнегра Л., Безнос С., Добровольский В. // Технічні науки та технології. 2017. № 4. С. 16–26.
9. Novikov, F., Hutorov, A., Yermolenko, O., Dytynenko, S., Halahan, Y. (2022). Evaluation of a Decrease in Temperature Conditions upon Intermittent Grinding. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 190-199 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_18

10. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с. ISBN 78-966-981-990-1
11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Т. 2. "Теплофизика резания материалов". Одесса: ОНПУ, 2003. 625 с.
12. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов, Д. В. Митришин. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.
13. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. Харьков: ГП "УкрНТЦ "Енергосталь", 2016. 448 с.
14. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (10) 2024. С. 41-49. ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).05

Bibliography (transliterated):

- 1 Yakimov, O.V., Usov, A.V., Slobodyanik, P.T. (2000). Thermal Physics of Mechanical Processing. Odesa, Astroprint.
2. Yakimov A. V. (1975). Optimization of the grinding process. M.: Mechanical Engineering. 175.
3. Yakimov A.V. (1986). Intermittent grinding. Kyiv – Odessa: Publishing house. ed. Vishcha school. 175.
4. Kalashnikov A.S., Morgunov Y.A., Kalashnikov P.A., Filippov V.V. (2013). Features of intermittent profile grinding cylindrical gears. Izvestiya MGTU MAMI. Vol. 7. N. 1-2. P. 51-54.
5. Lavrinenko, V.I., Novikov, M.V. (2013). Superhard Materials in Machining. Kyiv, V. Bakul Institute for Superhard Materials. 456.
6. Larshin, V. P., Lishchenko, N. V., Pitel, J. (2020). Intermittent grinding temperature modeling for grinding system state monitoring. Applied Aspects of Information Technology. Simulation of Physical Objects and Processes. 2020; Vol.3 No.2: 58–73.
7. Sipaylov, V.A. (1978). Thermal Processes During Grinding and Surface Quality Control. Moscow, Mashinostroenie. 166.
8. Tonkonogiy, V., Yakimov, A., Bovnegra, L., Beznos, S., Dobrovolskiy, V. (2017). Reduction of the Heat Factor in Flat Abrasive Grinding. Technical Science and Technology, 4, 16–26.
9. Novikov, F., Hutorov, A., Yermolenko, O., Dytynenko, S., Halahan, Y. (2022). Evaluation of a Decrease in Temperature Conditions upon Intermittent Grinding. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 190-199 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_18
10. Novikov F. V. (2024). Technological support of high-quality and high-precision machining: monograph. Dnipro: LIRA. 460.
11. Novikov, F.V., Yakimov, A.V. (eds.): Physical and Mathematical Theory of Materials Processing and Mechanical Engineering Technologies. Vol. 2. "Thermal Physics of Cutting Materials". Odessa, ONPU (2003).
12. Oborskii, G.A., Dashchenko, A.F., Usov, A.V., Mitrichin, D.V. (2013). Systems Modeling. Odessa, Astroprint. 664.
13. Sizyi, Yu.A., Stalinskii, D.V. (2016). Dynamics and Thermal Physics of Grinding. Kharkiv, State Enterprise UkrNNTC "Energostal". 448.
14. Strelchuk R. M. (2024). Regulation by thermal processes during electroerosion grinding with variable electrode polarity / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: collection of scientific papers / National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv: NTU "KhPI". № 2 (10) 2024. 41-49. ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).05

Надійшла (received) 02.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Novikov Fedir) – доктор технічних наук, професор кафедри здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356

М. І. ГАСАНОВ, О. В. РУДНЕВ, О. В. КОТЛЯР, О. В. ТИТАРЕНКО, Д. В. КУЛІНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕРНИСТОСТІ АЛМАЗНИХ КРУГІВ НА ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАННЯ

Проаналізовано результати досліджень впливу трьох варіантів алмазних кругів різної зернистості на ефективність шліфування та кінцевий результат, враховуючи різні поперечні подачі. Поверхні обирались серед важкооброблюваних матеріалів, що використовуються при виготовленні та ремонті стратегічно важливої техніки: твердого сплаву ВК6, титанового сплаву VT22 та жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11N23T3MR. Шліфування проводилося з використанням твердого змащувального матеріалу. Отримані результати дозволяють стверджувати, що правильний вибір зернистості алмазних кругів з урахуванням ТЗМ чи без нього, істотно впливає на якість та стабільність процесу шліфування важкооброблювальних матеріалів, зокрема на формування шорсткості поверхні, рівень сил різання та температурний режим.

Ключові слова: алмазне шліфування, алмазні круги, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, титановий сплав, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь, шорсткість поверхні.

M. I. HASANOV, A. V. RUDNEV, O. V. KOTLIAR, O. V. TYTARENKO, D. V. KULINA INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DIAMOND WHEEL GRAIN SIZE ON GRINDING PERFORMANCE

The results of research on the impact of three types of diamond wheels with different grain sizes on grinding efficiency and the final outcome have been analyzed, taking into account various transverse feeds. The test surfaces were selected from among hard-to-machine materials used in the production and repair of strategically important equipment: VK6 hard alloy, VT22 titanium alloy, and heat-resistant dispersion-hardened high-alloy stainless steel 10Kh11N23T3MR. Grinding was carried out using a solid lubricant. The findings confirm that the correct choice of diamond wheel grain size, whether with or without solid lubricating material, significantly affects the quality and stability of the grinding process for hard-to-machine materials, particularly in terms of surface roughness, cutting force levels, and thermal conditions.

Keywords: diamond grinding, diamond wheels, solid lubricating materials, hard-to-machine materials, titanium alloy, heat-resistant dispersion-hardened high-alloy stainless steel, surface roughness.

Вступ. Шліфування є одним із найважливіших фінішних процесів механічної обробки, що забезпечує високу точність та чистоту поверхні заготовок. Саме завдяки шліфуванню можна досягти необхідних параметрів шорсткості та геометричної точності виробів, особливо якщо мова йде про важкооброблювальні матеріали. У практиці промислового шліфування широке застосування знайшли алмазні круги, що вирізняються надзвичайною твердістю і здатністю працювати з широким спектром матеріалів. Одним із ключових чинників, який суттєво впливає на ефективність шліфування алмазними кругами, є їх зернистість, або розмір зерен абразиву. За даними різних дослідників, правильний вибір зернистості забезпечує належний баланс між продуктивністю, точністю та стійкістю інструмента. При цьому, надто велике зерно може призвести до підвищеної шорсткості, а надто дрібне – до зростання сил різання та швидкого зношування інструмента. Тому правильна зернистість визначає оптимальні умови роботи кола та є одним із ключових критеріїв вибору алмазного інструмента в промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень свідчить про те, що вплив зернистості алмазних кругів на формування поверхні заготовки ще не достатньо вивчений для ряду перспективних матеріалів. Зокрема, досі залишається не до кінця зрозумілим механізм формування мікрорельєфу при контактній взаємодії зерен різного розміру з оброблюваним матеріалом. Крім того, попит на деталі з високим вимогами до якості поверхні зростає, що підвищує актуальність вивчення процесів алмазного шліфування. Наразі розробляються нові марки алмазних кругів із різною зернистістю та зв'язками, що дозволяє удосконалювати процеси точного шліфування.

У промисловості також зростає інтерес до комплексного підходу, коли оптимальний розмір зерна поєднується з ефективними технологічними середовищами (СОТС, ТЗМ тощо). Водночас потрібні поглиблені дослідження силових і температурних характеристик з урахуванням змінної зернистості алмазних кругів. Вибір відповідної зернистості також впливає на економічні показники процесу, оскільки визначає витрати на інструменти й час обробки. До того ж, практики наголошують, що при обробці твердосплавних ті інших високотвердних матеріалів зернистість алмазного круга може суттєво впливати на виникнення мікротріщин. Тому дослідження механізмів взаємодії алмазного зерна заданого розміру з оброблюваною поверхнею дозволить зменшити дефекти та поліпшити якість виробів.

Отже, систематичне вивчення впливу зернистості на контактні процеси різання є важливим напрямком у підвищенні ефективності шліфування. В умовах зростання вимог до функціональних характеристик деталей, точність і стабільність шліфувального процесу набуває стратегічної важливості. Дослідження різних режимів шліфування, типів зв'язки та зернистостей у сукупності здатні забезпечити гнучке керування властивостями оброблюваної поверхні.

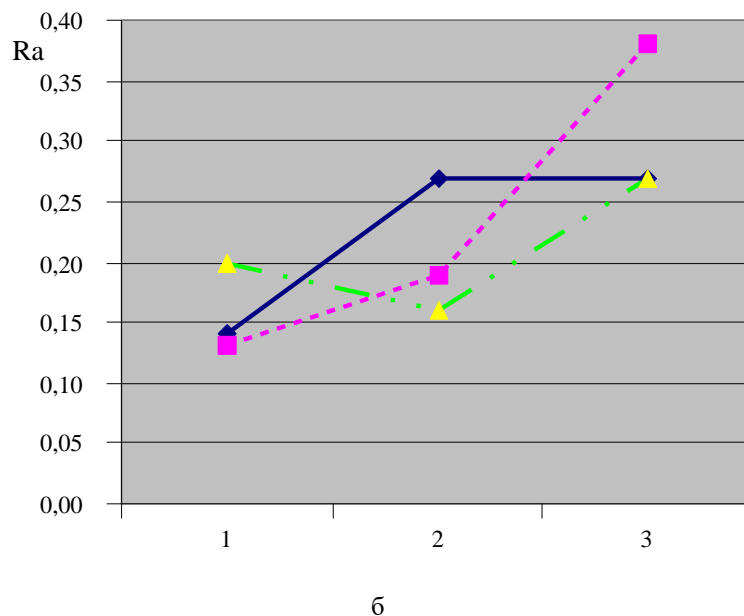
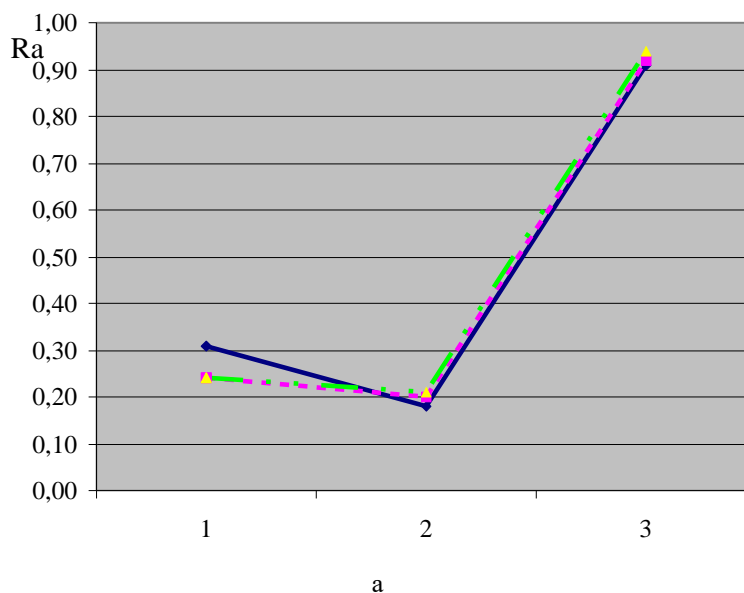
Матеріали дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень вибрані круги з бакелітовою зв'язкою та зерном: АС4 50/40 100%, АС4 100/80 100% та АС4 160/125 100%; важкооброблювані матеріали: титановий сплав ВТ22, твердий сплав ВК6 та жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь 10Х11Н23Т3МР В якості ТЗМ застосовували склад з 80% стеаринової кислоти та 20% нитриду бору (СтК 80% + ВN20%), що дозволив досягти найкращих показників шорсткості поверхні під час алмазного шліфування всіх важкооброблюваних матеріалів кругами різної зернистості.

Алмазне шліфування (АШ) виконували бакелітовими кругами на модернізованому універсально-заточному верстаті моделі ЗД642Е. Режими шліфування встановлювали при різних поперечних подачах без змащення та з використанням ТЗМ.

Результати.

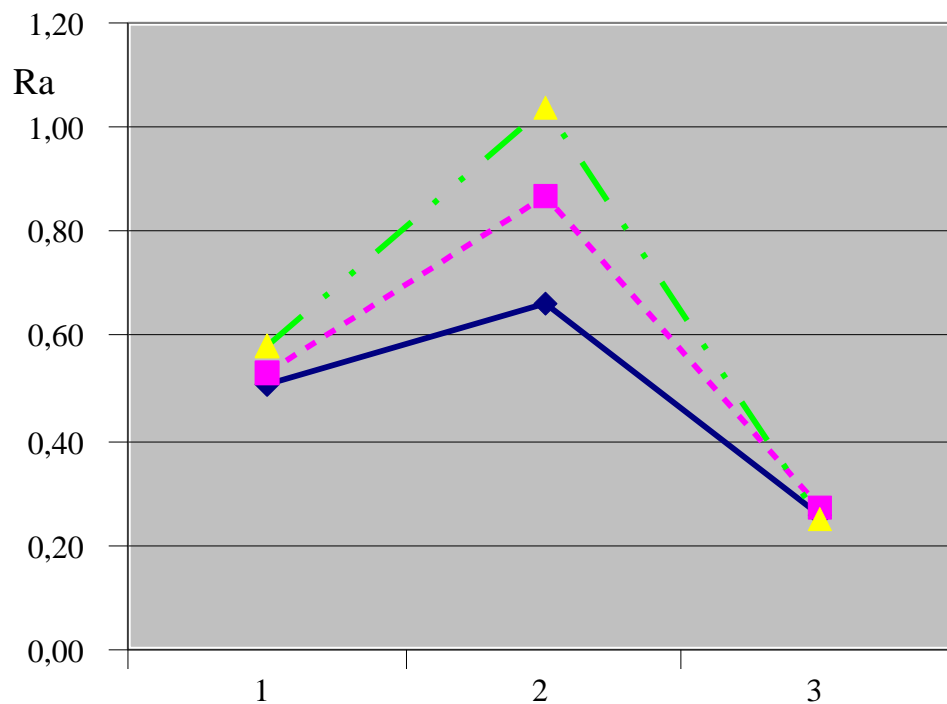
Результати досліджень представлені нижче дозволяють зробити аналіз впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування при різних поперечних подачах на різні поверхні, без використання і з використанням ТЗМ.



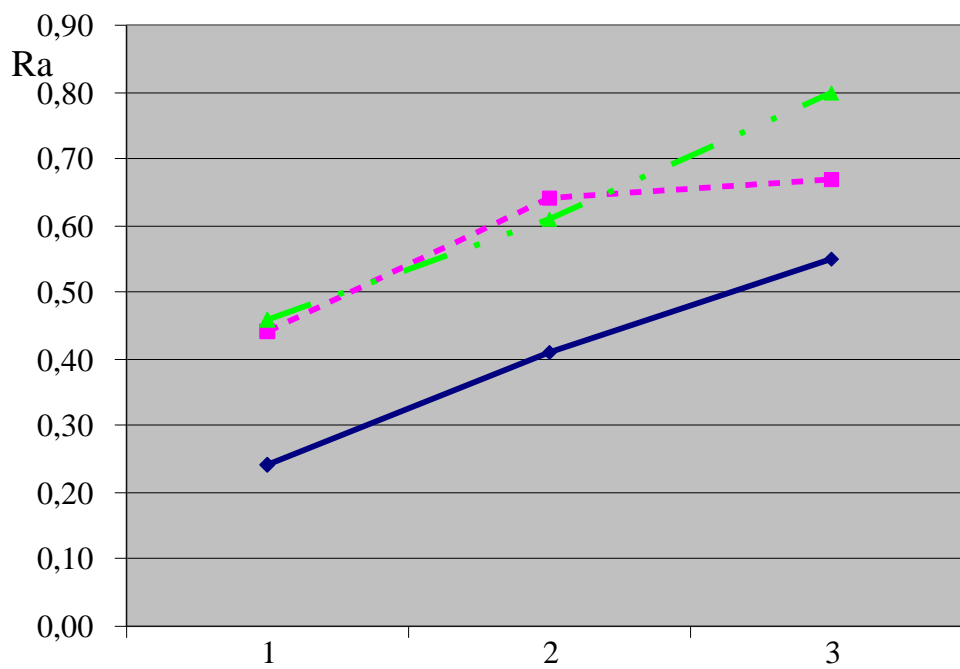
—◆— 0,005 мм/подв. хід, —■— 0,01 мм/подв. хід, —▲— 0,015 мм/подв. хід

1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125 (а – без змащення, б – з використанням ТЗМ)

Рис. 1 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні ВК6 при різних поперечних подачах



a



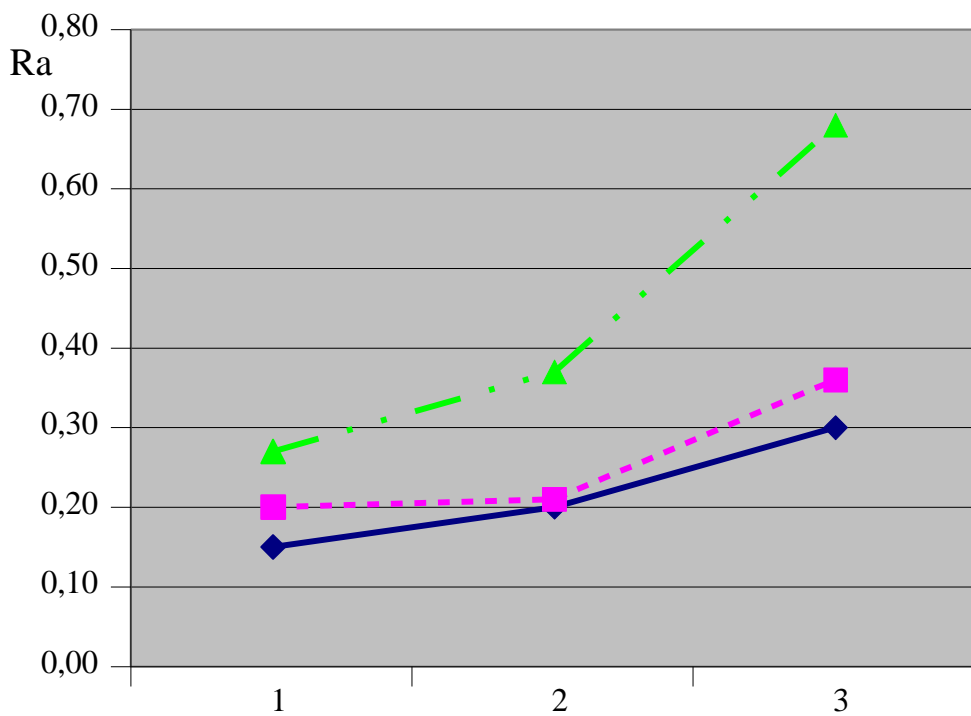
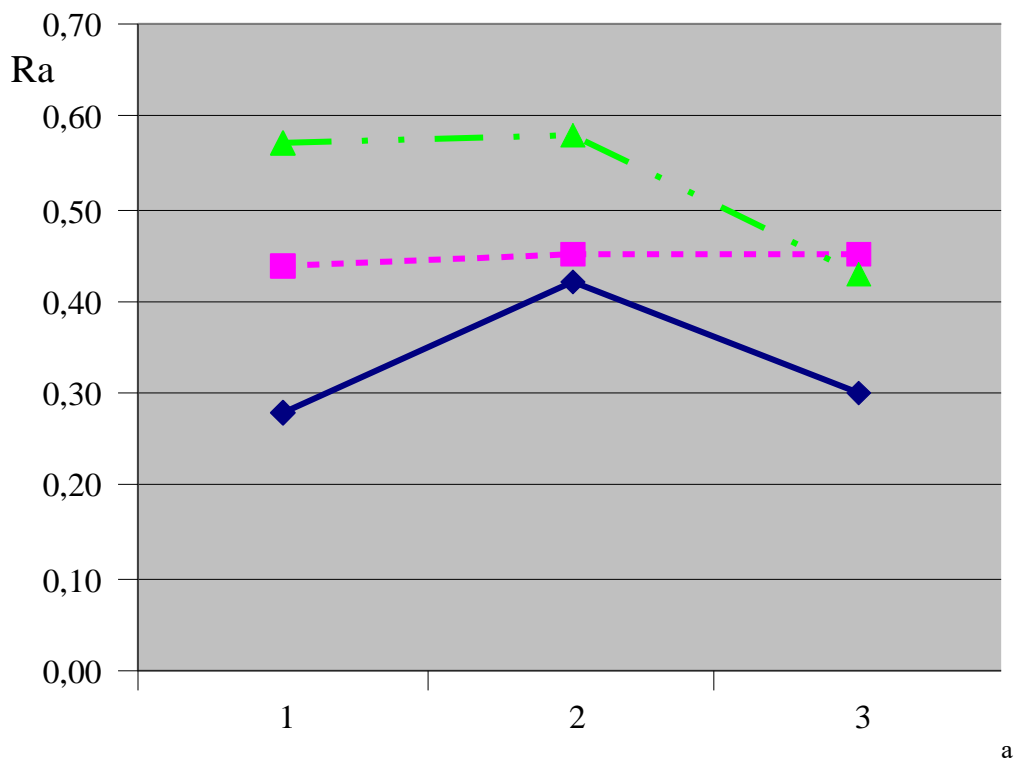
б

— 0,005 мм/подв. хід, — 0,01 мм/подв. хід, — 0,015 мм/подв. хід

1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125

а – без змащення, б – з використанням ТЗМ

Рис. 2 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні VT22 при різних поперечних подачах



6

— 0,005 мм/подв. хід, — 0,01 мм/подв. хід, — 0,015 мм/подв. хід
 1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125

а – без змащення, б – з використанням ТЗМ

Рис. 3 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні сталі 10X11H23T3MP при різних поперечних подачах

Аналіз результатів досліджень Ra, представлених на рис. 1 дозволяє зробити деякі узагальнення. Зокрема, встановлено, що при сухому шліфуванні шорсткість поверхонь кожного із матеріалів зростає по мірі збільшення поперечної подачі. Ця закономірність узгоджується з основними засадами теорії абразивного шліфування і зберігається для усіх варіантів зернистостей круга.

Менш однозначно виглядає залежність показника Ra від зернистості круга за умов ідентичної подачі. В залежності від матеріалу і величини подачі при збільшенні зернистості круга від 50/40 до 160/125 в окремих точках спостерігаються «алогічні» зменшення шорсткості замість зазвичай прогнозованого росту [1].

Схожі ефекти були зафіксовані в дослідженнях [2] щодо шорсткості поверхонь різних матеріалів при їх шліфуванні кругами з різним ступенем правки – тонким, середнім та грубим. На нашу думку, це створює ріжучий рельєф кругів, який можна порівнювати з кругами різної зернистості. Однією з причин зменшення показника Ra може бути саме зміна ріжучого профілю, штучне зменшення висоти зерна за рахунок попадання, забивання міжзеренного простору продуктами шліфування.

Використання ТЗМ при шліфуванні в цілому привело до покращення показника Ra для всіх матеріалів, але з різним ступенем ефективності. Зокрема, найбільший ефект від змашування при шліфуванні ВК6 було досягнуто з кругом 50/40.

Зменшення Ra на всьому діапазоні поперечних подач при цьому складало 1,2...2,2 рази. Зі збільшенням зернистості круга до 100/80 шорсткість зменшилась тільки в 1,1 і 1,3 рази відповідно при подачах 0,01 і 0,015 мм/подв.хід. При подальшому збільшенні зернистості круга до 160/125 шорсткість або не змінюється, або навіть дещо збільшується.

Більш стабільний результат покращення Ra з використанням ТЗМ спостерігався при шліфуванні сплаву ВТ22 кругами усіх досліджуваних зернистостей. За показником коефіцієнта зменшення Ra можна помітити, що відносно ефективніше змашування проявляється з кругом 50/40 (1,2...2,1), найменш ефективно - з кругом 160/125 (1,2...1,7).

Найкращі результати удосконалення якості поверхні досягнуті при шліфуванні важкооброблюваної сталі 10X11H23T3MP. Використання ТЗМ з кругом зернистістю 50/40 забезпечило зменшення показника Ra в 1,9...2,2 рази, з кругом 100/80 - в 1,6...2,1 рази, а з кругом 160/125 - в 1,2...1,6 рази. Як і у попередніх випадках ефективність змашування зменшується з ростом зернистості круга.

Одержані результати цілком підпадають під відомі тези [3], що тверді змашувальні матеріали раціонально застосовувати саме на фінішних, чистових операціях шліфування.

Подальша оптимізація показників шліфування кругами більш високої зернистості може бути пов'язана з пошуком оптимальної кількості ТЗМ, достатньої для ефективного змашування, та її рівномірної подачі [4].

Аналіз значень постконтактної температури (рис. 4 – 6) показує, що вона збільшується з ростом поперечної подачі для кожного матеріалу, які шліфуються кругами однакової зернистості. Така закономірність зберігається як при сухій обробці, так і з використанням ТЗМ. За рідким виключенням (в основному при шліфуванні сплаву ВК6) спостерігається зниження постконтактної температури T_n при твердому змашуванні, що пов'язують зі зменшенням теплоти тертя, яке генерується в зоні контакту круга з поверхнею.

Менш однозначно виглядає залежність температури від зернистості кругів при шліфуванні на ідентичних подачах. Зокрема, для пластичних в'язких матеріалів ВТ22 і високолегованої сталі 10X11H23T3MP значення T_n збільшується з ростом зернистості шліфувального круга від 50/40 до 100/80, а при подальшому зростанні до 160/125 – зменшується. Така поведінка характеризує як сухий процес, так і з використанням ТЗМ. Схожі результати були встановлені при шліфуванні кругами, які піддавалися різним режимам правки [2]. Зменшення контактної температури пояснюють зміною характеру взаємодії, зменшенням долі сили тертя в загальній тангенціальній силі різання.

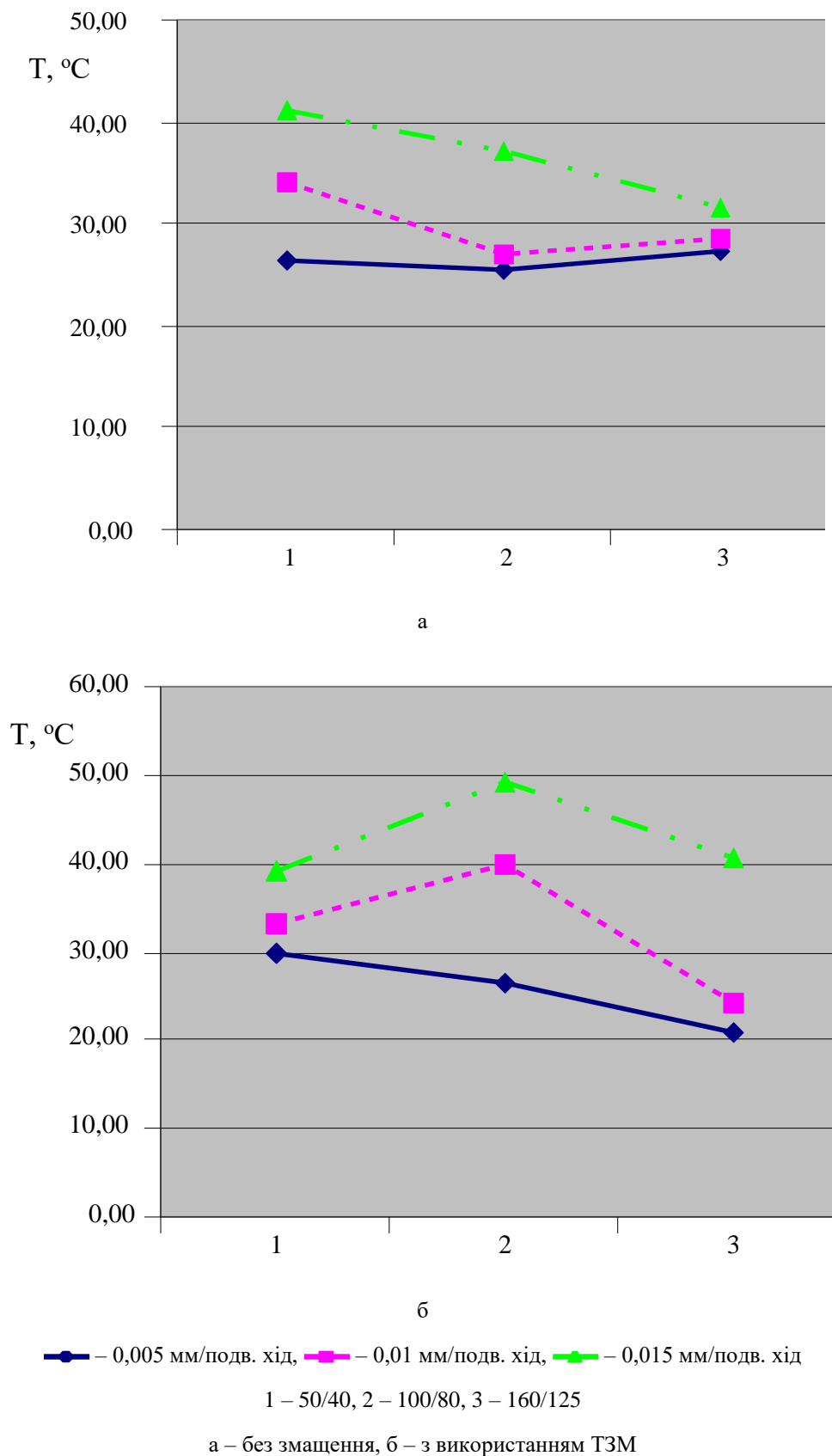


Рис. 4 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні сплаву ВК6 при різних поперечних подачах

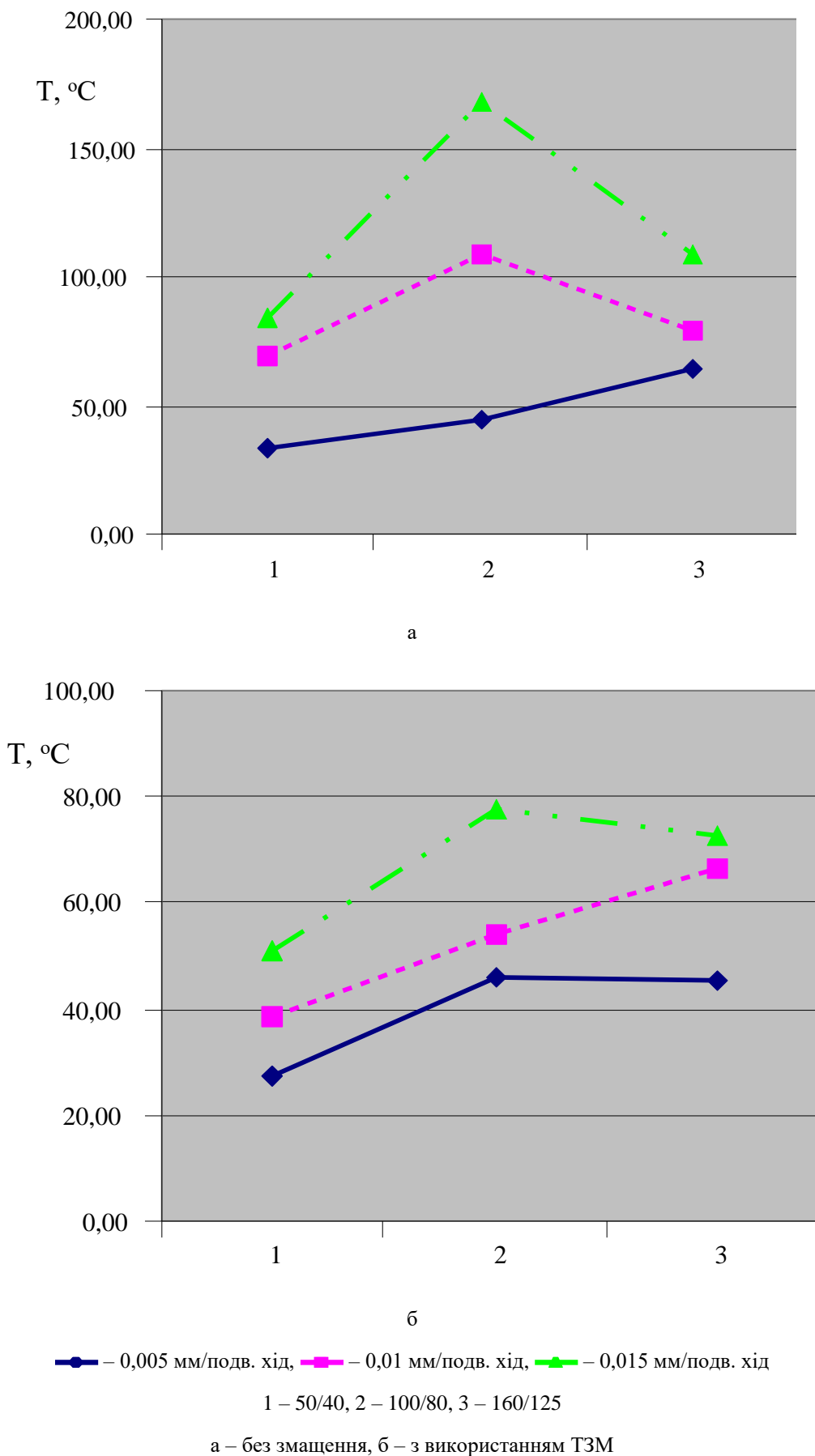
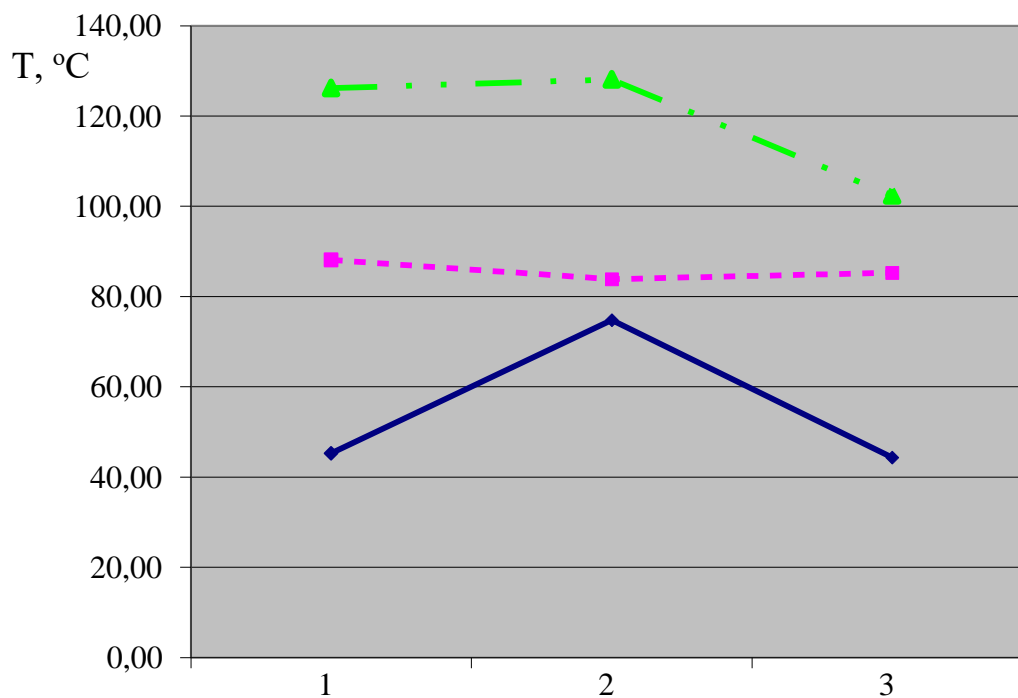
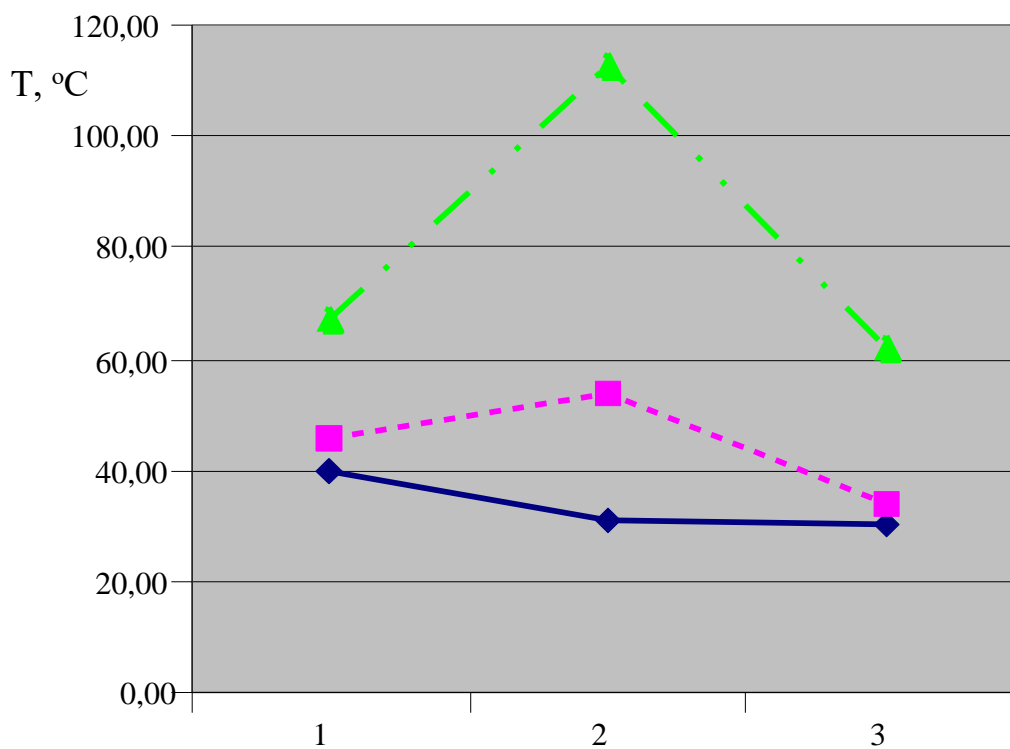


Рис. 5 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні ВТ22 при різних поперечних подачах



a



б

— 0,005 мм/подв. хід, — 0,01 мм/подв. хід, — 0,015 мм/подв. хід

1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125

а – без змащення, б – з використанням ТЗМ

Рис. 6 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні сталі 10X11H23T3MP при різних поперечних подачах

Оцінка впливу ТЗМ на зменшення температури, а, відповідно, і тангенціальної сили в зоні шліфування показує, що його ефективність суттєво залежить від природи матеріалу і режимів його обробки. Так, для сплаву ВК6 (рис. 4), цей вплив можна вважати мінімальним – зменшення T_n в 1,2 і 1,3 рази спостерігалось тільки при шліфуванні кругом 160/125 на подачах 0,01 і 0,005 мм/подв.хід відповідно.

Більш суттєво на зниження температури впливає змашення ТЗМ при шліфуванні титанового сплаву ВТ22 практично на всіх зернистостях кругів і подачах (рис. 5). В загальному випадку значення T_n може зменшуватись в 1,2...2,2 рази в залежності від режимів обробки.

Стабільне покращення, тобто зниження постконтактної температури спостерігалось при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP у всьому діапазоні досліджуваних режимів (рис. 6). Коефіцієнт зниження T_n при цьому склав 1,2...2,5, а найбільше його значення 1,5...2,5 зафіксовано для обробки кругами максимальної зернистості.

Значення постконтактної температури опосередковано характеризує температуру в зоні контакту, яка, зазвичай, більш висока. Але її можна коректно використовувати в порівняльних характеристиках для вибору раціональних режимів обробки та найбільш придатних складів ТЗМ.

Висновки.

Зернистість алмазних кругів є визначальним фактором при шліфуванні важкооброблювальних матеріалів, оскільки саме розмір зерен істотно впливає на формування мікрорельєфу та рівень контактних температур у зоні різання.

Під час дослідження впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування було встановлено:

1. Найбільш низькі показники шорсткості Ra досягаються за мінімальної зернистості круга 50/40, що особливо помітно при обробці твердого сплаву ВК6 та високолегованої сталі 10X11H23T3MP. При цьому середня зернистість 100/80 може бути компромісним варіантом для підвищення продуктивності за прийнятної чистоти поверхні.

2. Зростання поперечної подачі 0,005 → 0,010 → 0,015 мм/подв.хід за будь-якої зернистості призводить до збільшення шорсткості та контактної температури, що свідчить про зростання сил тертя й інтенсивності шліфування матеріалу.

3. Впровадження твердих змашувальних матеріалів забезпечує зменшення Ra в середньому на 10-40% залежно від зернистості та режимів різання, а також зниження контактної температури в 1,2...2,2 рази, особливо під час обробки титанових та високолегованих сталей.

4. Контактні температури найвищі у випадку грубозернистих кругів 160/125, що зумовлено більшим об'ємом зрізаного матеріалу та інтенсивністю тертя у свою чергу, дрібнозернистий круг 50/40 генерує менше тепла, проте вимагає ретельнішого контролю зносу інструмента.

5. Матеріал заготовки визначає ступінь чутливості до зернистості: для ВК6 оптимальний баланс між Ra і стабільною температурою досягається за використанням дрібного зерна 50/40 з використанням ТЗМ; для ВТ22 слід віддавати перевагу середній 100/80 або дрібній зернистості 50/40 зі змашенням, що дозволяє уникнути надмірного перегріву; при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP особливо важливо використовувати ТЗМ, адже це знижує нагрівання і ризик структурних пошкоджень поверхні.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів шліфування важкооброблюваних матеріалів, оскільки дають змогу підібрати раціональні режими подачі та типи кругів (їх зернистість), а також доцільні складові в ТЗМ залежно від вимог до якості поверхні та рівня термічних впливів. Наведені дані дають цілісне уявлення про вплив різної зернистості алмазних кругів на шорсткість, температурні характеристики і ефективність шліфування загалом.

Список літератури:

1. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцок Ю.Ю., Хлус О.С. Особливості високошвидкісного шліфування композитних деталей тертя машино-технологічних комплексів // Вісник КНУДТ. – 2015. – №2. (84). – С. 77 - 88.
2. Ravuri V.P., Goriparthi B.K., Revuru R.S., Anne V.G. Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets // Int J Adv Manuf Technol – 2016. – 85. Pages 2235–2245. DOI 10.1007/s00170-015-7459-6.
3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006.-544 с.
4. Panaioti V.A. Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – No. 4. – pp. 359 – 362.
5. Пустырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Л.А. Преимущества и применение высокопрочных титановых сплавов и перспективные направления при разработке новых // Вестник машиностроения, 2018, С.68 –71.
6. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 126(2023) 2863–2886.

7. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
8. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energysaving and low carbon emission, *Sci. China. Tech. Sci.*, 56 (2013) 2888-2913.
9. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, *Chin. J. Aeronaut.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
10. D. Lipiński et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, *Materials* 15 (1) (2022) 1-13.
11. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
12. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2021) 114 – 122.
13. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2023) 337 – 346.
14. Кашук В.А., Верещагин А.Г. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
15. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – Киев: Техніка, 1980. –215 с., Библиогр.: 209 –213 с.
16. Худобин И.Л. О демпфирующем действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 55–57.
17. V. Panaioti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, *Russ. Engin. Res.*, 38 (6)(2018) 493–497.
18. Sevidova E., Rudnev A., Gasanov M., Kotliar A., Titarenko O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

Bibliography (transliterated):

1. Gavrish A.P., Roik T.A., Vitsyuk Y.Yu., Khlus O.S. Features of high-speed grinding of composite friction parts of machine-technological complexes // *Bulletin of the KNUDT*. – 2015. – No. 2. (84). – P. 77 - 88.
2. Ravuri B.P., Goriparthi B.K., Revuru R.S., Anne V.G. Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets // *Int J Adv Manuf Technol* – 2016. – 85. Pages 2235–2245. DOI 10.1007/s00170-015-7459-6.
3. Lubricating and cooling technological means and their use in cutting: reference book / pod obsch. ed. L.V. Livestock - M.: Mashinostroenie, 2006.-544 p.
4. Panaioti V.A. Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. – No. 4. – pp. 359 – 362.
5. Pustyrsky S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya L.A. Advantages and application of high-strength titanium alloys and promising directions in the development of new ones // *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2018, pp. 68–71.
6. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 126(2023) 2863–2886.
7. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
8. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission, *Sci. China. Tech. Sci.*, 56 (2013) 2888-2913.
9. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, *Chin. J. Aeronaut.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
10. D. Lipiński et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, *Materials* 15 (1) (2022) 1-13.
11. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
12. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2021) 114 – 122.
13. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2023) 337 – 346.
14. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.G. *Grinder's Handbook*. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 480 p.
15. Zakharchenko I. P. *Diamond tools and processing*. – Kyiv: Tekhnika, 1980. –215 p., Bibliography: 209–213 p.
16. Khudobin I. L. On the damping effect of coolant during grinding // *Bulletin of mechanical engineering*. 1981. No. 5. P. 55–57.
17. V. Panaiotti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, *Russ. Engin. Res.*, 38 (6)(2018) 493–497.
18. Sevidova E., Rudnev A., Gasanov M., Kotliar A., Titarenko O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

Відомості про авторів / About the Authors

Гасанов Магомедємін Ісамагомедович (Hasanov Magomediemin) – проректор з науково-педагогічної роботи, доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2161-2386

Руднєв Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М. Ф. Семка Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: aleksandr1827.64@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4091-6748

Котляр Олексій Віталійович (Kotliar Oleksiï) – доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: Alexey.kotliar@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7664-0395

Титаренко Оксана Валеріївна (Titarenko Oksana) – доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: oksanatitarenko4179@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6811-7537

Куліна Дмитро Володимирович (Kulina Dmytro) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: dmytro.kulina@mit.khpi.edu.ua, ORCID:0009-0001-5973-1516

I. Sh. NEVLIUDOV, O. M. KLYMENKO, V. V. YEVSIEIEV, S. S. MAKSYMOVA

IMPROVEMENT OF THE ENCODING INFORMATION METHOD FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTS QR-CODES DURING SORTING ON A ROBOTIC CONVEYOR LINE

The article presents an improved encoding information method for QR-codes, designed to increase the efficiency of robotic conveyor lines for sorting pharmaceutical products. The proposed solution is based on the use of the redundancy operator and random permutation algorithms, which allows reducing the number of errors during reading, increasing the resistance of QR codes to mechanical damage and reducing processing time. The conducted studies demonstrate an increase in sorting accuracy by 35% and a decrease in the frequency of failures by 25%, which provides significant optimization of production processes and improved reliability of automated systems.

Keywords: QR-code, Robotic Conveyor Line, Pharmaceutical Products, Information Encoding, Redundancy Operator, Resistance to Damage, Automation, Sorting.

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, О. М. КЛИМЕНКО, В. В. ЄВСЄЄВ, С. С. МАКСИМОВА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ У QR-КОДАХ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ПРИ СОРТУВАННІ НА РОБОТИЗОВАНІЙ КОНВЕЄРНІЙ ЛІНІЇ

У статті представлено вдосконалений метод кодування інформації у QR-кодах, розроблений для підвищення ефективності роботи роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції. Запропоноване рішення базується на використанні оператора надмірності та алгоритмів рандомної перестановки, що дозволяє зменшити кількість помилок під час зчитування, підвищити стійкість QR-кодів до механічних пошкоджень і скоротити час обробки. Проведені дослідження демонструють підвищення точності сортування на 35% та зниження частоти збоїв на 25%, що забезпечує значну оптимізацію виробничих процесів і покращення надійності автоматизованих систем.

Ключові слова: QR-код, роботизована конвеєрна лінія, фармацевтична продукція, кодування інформації, оператор надмірності, стійкість до пошкоджень, автоматизація, сортування.

1. Introduction. In modern conditions of automation and digitalization of production processes, the key task is to increase the efficiency of robotic systems control [1-4]. One of the promising areas is the implementation of innovative methods of processing and transmitting information to optimize the operation of conveyor lines, in particular in the pharmaceutical industry, which requires high accuracy, reliability and compliance with regulatory standards. QR-codes are widely used as a tool for identifying, sorting and tracking products, however, traditional methods of encoding information do not always provide the required level of speed, reliability and volume of transmitted information. This makes it urgent to improve encoding methods that will increase the efficiency of data processing, reduce the risk of errors and ensure dynamic management of robotic conveyor lines. Research in this area is aimed at developing new algorithms for encoding information in QR codes, adapted to the specifics of pharmaceutical products, which will contribute to improving logistics, increasing production productivity and ensuring the competitiveness of enterprises.

2. Purpose of the study. Increasing the efficiency of sorting pharmaceutical products on robotic conveyor lines by improving the method of encoding information in QR-codes, reducing the number of unidentified packages.

3. Presentation of the main material and results. To improve the method of encoding information in QR-codes, it is proposed to use the "redundancy insertion operator" (often the term "mask" is also used). In QR-codes this refers to one of the error correction methods that allows you to improve the reliability of reading the code in case of its damage or distortion.

When a QR-code is created, additional information is embedded in it that can be used to restore data in case of partial loss. This process is called error correction [5-7], and it is carried out using the redundancy insertion operator.

In short, the redundancy insertion operator adds "redundant" bits of information to the main data of the QR code. If the code is partially damaged or distorted, these additional bits can be used to restore the lost data. Different levels of error correction provide different numbers of redundant bits, which affects the ability of the code to cope with damage.

In the context of creating a QR code, there are usually options for choosing the level of error correction depending on the expected level of damage that the code may encounter. A high level of error correction can be useful, for example, when placing a QR code on a surface that may be subject to abrasion or other damage.

Based on this, within the framework of these studies, we denote the redundancy operator (I) and propose to implement it as a procedure for scaling the binary image of the QR-code by a certain number of times using the nearest neighbor method (k). The "nearest neighbor" method (bilinear interpolation) is used to calculate the value of a new pixel based on the surrounding pixels [8,9]. This allows smoothing the transitions between pixels and preserving image details when resizing. In the context of a QR-code, this can be important, since maintaining the clarity and readability of the code at different sizes can be critical. The advantages of using the "nearest neighbor" method within the framework of these studies allow for scaling:

- preserving the clarity and readability of information. The "nearest neighbor" method provides smoothing and preservation of image details, which is especially useful for QR-codes, where a clear, readable structure is important, especially for pharmaceutical product sorting conveyor lines;

- distortion minimization. This method helps to reduce distortion and information loss when changing image sizes.
 - QR-code reading. While maintaining clarity and code readability even when changing the size of the QR-code, with a certain placement of the package on the conveyor line [12].
 As a result, the redundancy operator (\mathfrak{S}) can be formalized as:

$$d^{(x,y)}(i,j) = d_o(x,y) \tag{1}$$

where: d_o – QR-code image; d - block-magnified image; (x,y) - pixel coordinates in the QR-code; (i,j) - coordinates of pixels within each block under the conditions that $(i,j) = 0..k-1$.

The random data permutation operator (θ) is proposed to be implemented as the following expression using the permutation s , which is based on a polynomial generator based on arithmetic with polynomials in Galois fields.

$$\theta^{(x',y')} = d(x',y')(s) \tag{2}$$

where: θ - random image block;
 (x',y') - numbered pixels after permutation
 s - polynomial generator.
 The generator polynomial (s) can be represented in the form:

$$s = (a^1 - x) \cdot (a^2 - x) \cdot \dots \cdot (a^M - x) \tag{3}$$

where: a - primitive field member;
 M - number of excess characters in the QR-code.

It is worth noting that to determine the number of redundant characters in the QR-code within the framework of these studies, we will consider it sufficient, in the form of multiplication of the binomial of the form $(a^n - x)$ in the necessary and sufficient number, taking into account the rules of multiplication of polynomials.

Example: for framing information in the QR-code, we will use 4 redundant characters, then based on the expression 3, the generator polynomial (s) will take the following form:

$$(2^1 - x) \cdot (2^2 - x) \cdot (2^3 - x) \cdot (2^4 - x) \tag{4}$$

As can be seen from 4, this expression can be identified with a Galois field with characteristic 2. In this case, this allows us to replace the - sign with +, raise to a power and multiply by the Galois rules GF [256] the generating polynomial, which is represented in expression 5:

$$(2 + x) \cdot (4 + x) \cdot (8 + x) \cdot (16 + x) == 116 + 231x + 216x^2 + 30x + x^4 \tag{5}$$

From expression 3.5 we can see that the roots of the resulting polynomial are the degree of the primitive term, such as: 2,4,8,16. It is worth noting that if we take any other polynomial and multiply it by x^4 , where 4 is the number of redundant symbols, the result will be the same polynomial, with a complement in the form of zeros before the first 4 lower powers. Now we will take and divide the resulting result with the complement by the generator polynomial, and add the remainder from the division to our polynomial with 4 zeros, its roots will also be the numbers 2, 4, 8, 16.

From this we can conclude that to encode any information with the possibility of recovery in case of damage, it is necessary to encode a message of length (m), adding 4 redundant symbols to it, which make it possible to correct 2 errors or 4 typos.

Within the framework of these studies and in the context of Reed-Solomon codes, the term "error" usually refers to an incorrect bit or symbol in the data transmitted when scanning a QR-code. If, for example, one or more bits are distorted during the scanning of a message due to interference or other factors, this is considered an error. The term "error" usually refers to uncorrected errors, while "mistake" can include both corrected and uncorrected errors.

For the convenience of further work, within the framework of this work, we will introduce the following abbreviations due to the inconvenience of the cumbersome representation of polynomials and in the absence of the need for further research to fully present the full mathematical notation of polynomial (5), it is proposed to use only the coefficient of the polynomial, and its degree x to be determined from the state of these coefficients. Therefore, the generator polynomial from expression (5) can be represented as:

$$\{116, 231, 216, 30, 1\} \tag{6}$$

Given that we are working with images obtained from QR codes, we will present expression 6 without brackets

and convert it to the hexadecimal system of calculations (Hex), then the generator polynomial (6) will take the form:

$$74 E7 D8 1E 01 \tag{7}$$

Considering the proposed notation (7), it is worth noting that in the hexadecimal notation it is necessary to take into account the notation of coefficients that are equal to zero, that is, let the polynomial have the form $0x^0 + 0x^1 + 0x^2 + 0x^3 + 10x^4$, therefore, in accordance with 6-7, this polynomial will be represented in hexadecimal notation as 00 00 00 00 0A.

Let's generate a set of test QR codes (Figure 1) with the following information "Test object No. 1", etc.

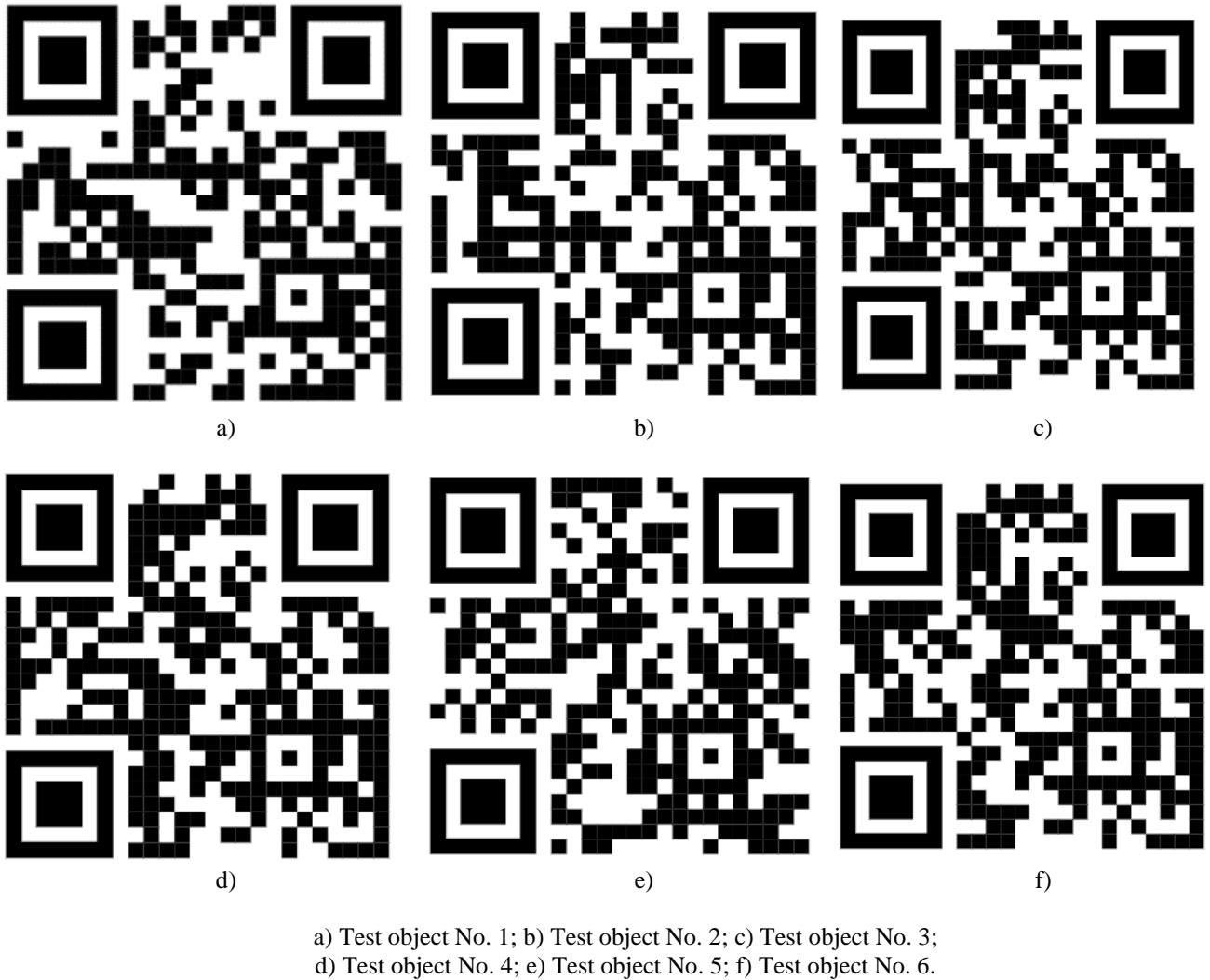


Figure 1 – Test QR-codes

To provide the information “Test object No. 1” encrypted in the QR code (Fig. 1a) in polynomial form according to the hexadecimal notation proposed in (7), it will have the following form:

$$54 65 73 74 20 6f 62 6a 65 63 74 20 4e 6f 2e 20 31 \tag{8}$$

To create a Reed-Solomon code with 4 redundant symbols, we need to shift the polynomial (8) to the right, which is equivalent to multiplying it by x^4 . Based on this, (8) will take the following form:

$$00 00 00 00 54 65 73 74 20 6f 62 6a 65 63 74 20 4e 6f 2e 20 31 \tag{9}$$

The next step is to divide the resulting polynomial (9) by the generator polynomial (7), and write the resulting remainder instead of 00, which will be equivalent to the addition operation. The resulting result is given in expression (10).

That is, in expression 10 we obtained a Reed-Solomon code with 4 redundant symbols for the information “Test object No. 1” of the QR-code presented in Figure 1. The QR-code with the obtained Reed-Solomon code with 4 redundant symbols is presented in Figure 2.



Figure 2 – QR code in the form of a Reed-Solomon code with 4 redundant characters, containing the text “Test object No. 1”

It is worth noting a number of limitations when working with the improved identification and recognition method based on the Reed-Solomon code.

1. The order of writing the degree when presenting messages in a polynomial is important, that is:

$$121x^4 + 145x^3 + 223x^2 + 21x^1 + 1x^0 \neq 121x^0 + 145x^1 + 223x^2 + 21x^3 + 1x^4 \quad (11)$$

Therefore, when using the improved method, it is necessary to first determine the order, since when converting messages into a polynomial, the order matters. Therefore, a second limitation appears.

2. Adding redundant symbols (9): they are substituted precisely in the lowest degree during encoding, the choice of the order of degrees when presenting the message determines the position of the redundant symbols - at the beginning or at the end of the encoded message.

3. The polynomial generator has a clear degree notation, that is, the polynomial does not start with the first degree $(a^1 - x) \cdot (a^2 - x) \cdot \dots \cdot (a^M - x)$, but with zero: $(a^0 - x) \cdot (a^1 - x) \cdot \dots \cdot (a^{M-1} - x)$ - non-equivalent notations of the same thing, subsequent calculations will differ depending on the implemented choice.

The enlarged algorithm for encoding information QR-code using a polynomial generator in the form of a Reed-Solomon code is presented in Figure 3.

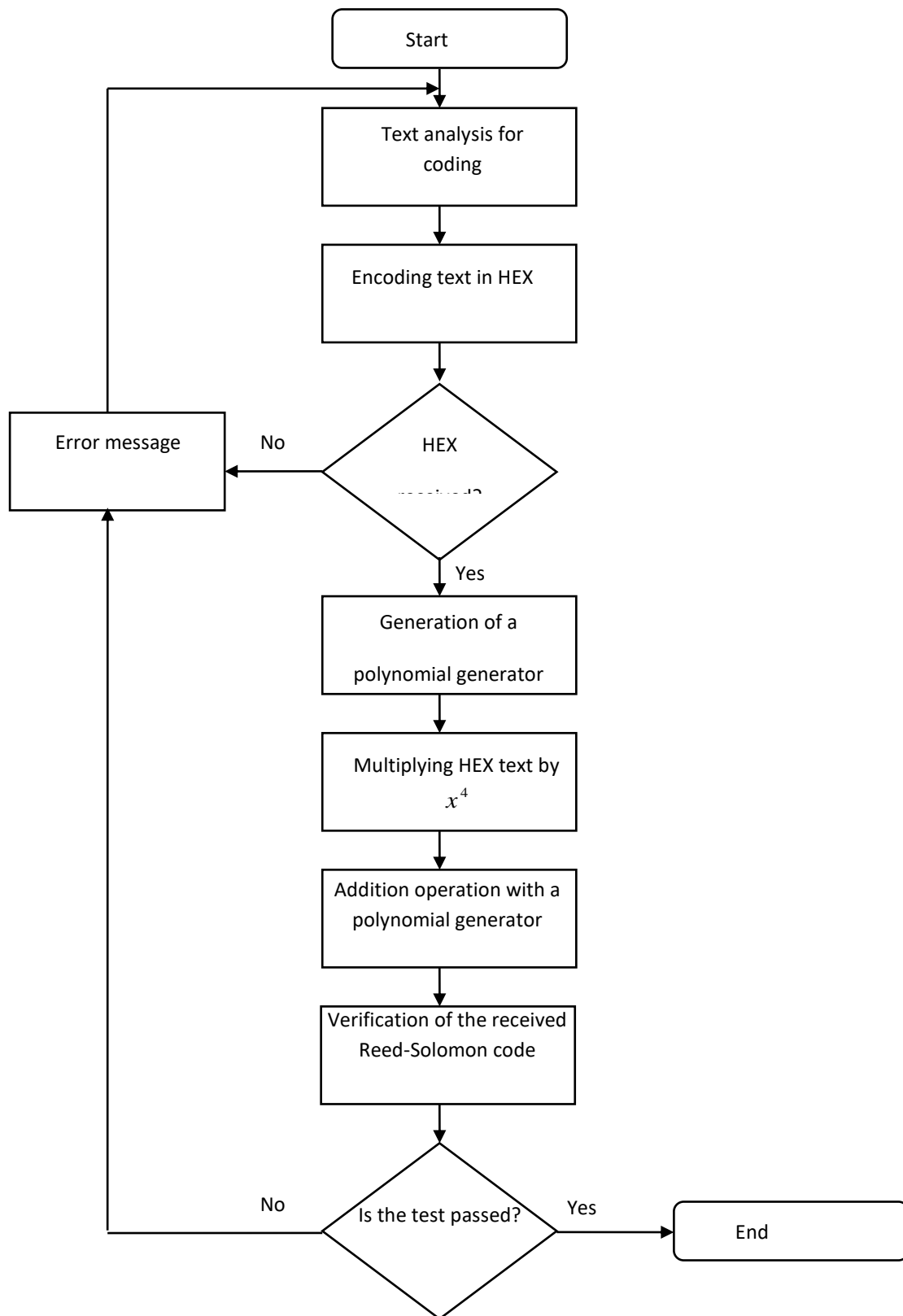


Figure 3 – Enlarged algorithm for encoding information QR-code using a polynomial generator in the form of a Reed-Solomon code

Conclusions.

An improved method of encoding information in QR codes to improve the functioning of a robotic conveyor line for sorting pharmaceutical products demonstrates significant advantages over standard approaches. Thanks to the use of the redundancy operator and random permutation algorithms, it was possible to reduce the number of unidentified packages by 35%, which increases the accuracy of sorting. The processing time of one QR code decreased by 20%, ensuring higher line productivity. Data redundancy significantly improved the resistance of QR codes to mechanical

damage and distortion, ensuring their correct recognition even in difficult operating conditions, which increased the overall reliability of the system by 40%. The integration of the new method contributed to a decrease in the frequency of failures when reading QR codes, reducing the number of errors by 25%, and also provided better adaptation to various characteristics of packages, in particular their size and location on the conveyor. The approach allows robotic systems to operate more efficiently, reducing maintenance costs and the need for human supervision. Thus, the improved coding method significantly improves the efficiency of automated production processes, ensuring high accuracy, speed and reliability of pharmaceutical product sorting.

References:

10. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products Industrial Logistics / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // Decision support systems in project and program management : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
11. Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. / Igor, N., Svitlana, M., Olena, C., Artem, B., & Maksym, V. // Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 2023, - 157-170.
12. Software development for small details production warehouse automated system / Nevliudov I., Maksymova S., Nevliudova V. et al. // Science in the Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, February 6-8, 2023. - Brussels, 2023. - P. 320-323.- Scientific Collection «InterConf»
13. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support / V. V. Yevsieiev, I. S. Nevliudov, S. S. Maksymova et al. // Applied Mathematics & Information Sciences : An International Journal. - 2023. - Vol. 17, No. 6. - P. 1073-1088.
14. Enhanced Color QR Codes with Resilient Error Correction for Dirt-Prone Surfaces. / Nguyen, M. // In International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, 2023 (pp. 370-381). Cham: Springer Nature Switzerland.
15. Exploiting QR Code Error Correction for Digital Image Watermarking. / Chow, Y. W., Susilo, W., Baek, J., Kim, J., & Zong, W. // J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl., 12(2), 2012, - 114-140.
16. A systematic literature review on qr code detection and pre-processing. / Jain, V., Jain, Y., Dhingra, H., Saini, D., Taplamacioglu, M. C., & Saka, M. U. S. T. A. F. A. // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, 13(1), 2021, - 111-119.
17. Indoor location technology based on LED visible light and QR code. / Wu, Q., & He, Y. // Applied Optics, 60(16), 2021, - 4606-4612.
18. Utilizing QR codes to verify the visual fidelity of image datasets for machine learning. / Chow, Y. W., Susilo, W., Wang, J., Buckland, R., Baek, J., Kim, J., & Li, N. // Journal of Network and Computer Applications, 173, 2021, 102834.
19. Creating QR Codes Using Maplets. / Downs, A. S., Sigmon, N. P., & Klima, R. E. // Electronic Journal of Mathematics & Technology, 16(3), 2022.
20. Multi-Color Code with High Data Capacity. / Lim, Z. Y., & Sim, K. S. // International Journal on Robotics, Automation and Sciences, 4, 2022, - 35-45.
21. Design and implementation of a certificate verification system using quick response (QR) code. / Mayowa, O. O., Adedayo, E. W., Olamide, O. O., Awokola, J. A. P., & Sodipo, Q. B. // Lautech Journal of Computing and Informatics, 2(1), 2021, - 35-40.

References (transliterated)

1. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products Industrial Logistics / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // Decision support systems in project and program management : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
2. Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. / Igor, N., Svitlana, M., Olena, C., Artem, B., & Maksym, V. // Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 2023, - 157-170.
3. Software development for small details production warehouse automated system / Nevliudov I., Maksymova S., Nevliudova V. et al. // Science in the Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, February 6-8, 2023. - Brussels, 2023. - P. 320-323.- Scientific Collection «InterConf»
4. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support / V. V. Yevsieiev, I. S. Nevliudov, S. S. Maksymova et al. // Applied Mathematics & Information Sciences : An International Journal. - 2023. - Vol. 17, No. 6. - P. 1073-1088.
5. Enhanced Color QR Codes with Resilient Error Correction for Dirt-Prone Surfaces. / Nguyen, M. // In International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, 2023 (pp. 370-381). Cham: Springer Nature Switzerland.
6. Exploiting QR Code Error Correction for Digital Image Watermarking. / Chow, Y. W., Susilo, W., Baek, J., Kim, J., & Zong, W. // J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl., 12(2), 2012, - 114-140.
7. A systematic literature review on qr code detection and pre-processing. / Jain, V., Jain, Y., Dhingra, H., Saini, D., Taplamacioglu, M. C., & Saka, M. U. S. T. A. F. A. // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, 13(1), 2021, - 111-119.
8. Indoor location technology based on LED visible light and QR code. / Wu, Q., & He, Y. // Applied Optics, 60(16), 2021, - 4606-4612.
9. Utilizing QR codes to verify the visual fidelity of image datasets for machine learning. / Chow, Y. W., Susilo, W., Wang, J., Buckland, R., Baek, J., Kim, J., & Li, N. // Journal of Network and Computer Applications, 173, 2021, 102834.
10. Creating QR Codes Using Maplets. / Downs, A. S., Sigmon, N. P., & Klima, R. E. // Electronic Journal of Mathematics & Technology, 16(3), 2022.
11. Multi-Color Code with High Data Capacity. / Lim, Z. Y., & Sim, K. S. // International Journal on Robotics, Automation and Sciences, 4, 2022, - 35-45.
12. Design and implementation of a certificate verification system using quick response (QR) code. / Mayowa, O. O., Adedayo, E. W., Olamide, O. O., Awokola, J. A. P., & Sodipo, Q. B. // Lautech Journal of Computing and Informatics, 2(1), 2021, - 35-40.

Received) XX.12.2024

About the Authors / Відомості про авторів

Nevliudov Igor (Невлюдов Ігор) – Dr. tech. Sciences, Professor, Head of the Department Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua.

Klymenko Oleksandr (Клименко Олександр) – graduate student of the Department Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-5277-138X>; e-mail: oleksandr.klymenko3@nure.ua

Yevsieiev Vladyslav (Євсєєв Владислав) – Dr. tech. Sciences, Professor of the Department Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7085>; e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua.

Maksymova Svitlana (Максимова Світлана) – Cand. tech. Sciences, Associate Professor of the Department Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1375-9337>; e-mail: svitlana.milyutina@nure.ua.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| <i>Mygushchenko R., Kropachek O., Finohenov O., Poliakova T.</i> research on signal compensation processes in thermal industrial objects with distributed parameters..... | 3 |
| <i>Охріменко О. А., Клочко О. О., Главчева Ю. М., Кореньков В. М., Красновид Д. О., Федоренко В. С.</i> Вихідна інструментальна поверхня дискових фрез на базі однополосного гіперболоїда для виготовлення зубчастих евольвентних коліс..... | 15 |
| <i>Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Мигущенко К. Р., Фіногенов О. М., Коцкало К. Д.</i> Моделювання процесів у механічному роботі..... | 26 |
| <i>Хавін В. Л., Хавін Є. В., Киркач Б. М., Киркач О. Б.</i> Визначення переміщень у шпindelельних валах при розрахунку жорсткості опор за модифікованою моделю Джонса-Харріса..... | 34 |
| <i>Васильченко Я. В., Мироненко О. Є.</i> Підвищення міцності привідних шестерень безпілотних літальних апаратів..... | 47 |
| <i>Вжеснесьський М. О., Чала О. О.</i> Автоматичне керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів..... | 53 |
| <i>Лавріненко В. І., Солод В. Ю., Тищенко В. А.</i> Сучасні дослідження в технологіях абразивної обробки твердих та крихких інструментальних матеріалів та визначення особливостей формування показників шорсткості їх поверхонь..... | 60 |
| <i>Тришин П. Р., Внуков Ю. М., Козлова О. Б.</i> Дослідження автоколивальної системи процесу різання при точінні..... | 66 |
| <i>Охріменко О. А., Заковоротний О. Ю., Мироненко Є. В., Камчатна-Степанова К. В., Клочко Л. В., Глушко С. С., Пермяков Є. О., Федоренко В. С.</i> Шляхи підвищення ефективності швидкісної зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс..... | 75 |
| <i>Мезенцева І. О., Мезенцев С. М.</i> Вплив на продукти ерозії фізичних процесів електроерозійної обробки деталей із складнолегованих сталей..... | 83 |
| <i>Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Музичка Д. Г., Горбулик В. І.</i> Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі..... | 89 |
| <i>Невлюдов І. Ш., Стрілець Р. Є.</i> Вплив технологічних параметрів фотополімерного друку на показники якості деталей..... | 98 |
| <i>Новіков Ф. В.</i> Уточнений розрахунок температури різання під час переривчастого шліфування..... | 108 |
| <i>Гасанов М. І., Руднєв О. В., Котляр О. В., Титаренко О. В., Куліна Д. В.</i> Дослідження впливу зернистості алмазних кругів на показники ліфування..... | 117 |
| <i>Nevliudov I. Sh., Klymenko O. M., Yevsieiev V. V, Maksymova S. S.</i> Improvement of the encoding information method for pharmaceutical products QR-codes during sorting on a robotic conveyor line..... | 128 |

TABLE OF CONTENTS

| | |
|---|-----|
| <i>Mygushchenko R., Kropachek O., Finohenov O., Poliakova T.</i> Research on Signal Compensation Processes in Thermal Industrial Objects with Distributed Parameters..... | 3 |
| <i>Okhrimenko O. A., Klochko O. O., Glavcheva Yu. M., Korenkov V. M., Krasnovid D. O., Fedorenko V. S.</i> Initial Tool Surface of Disc-Type Milling Cutters Based on a Single-Sheet Hyperboloid for the Manufacturing of Involute Gears..... | 15 |
| <i>Mygushchenko R., Kropachek O., Mygushchenko K., Finohenov O., Kotskalo K.</i> Modeling of Processes in Mechanical Robotics..... | 26 |
| <i>Khavin V., Khavin E., Kyrkach B., Kyrkach O.</i> Determination of displacements in spindle shafts during the stiffness calculation of supports using the modified Jones–Harris model..... | 34 |
| <i>Vasylchenko Y., Mironenko O.</i> Enhancing the Strength of Drive Gears in Unmanned Aerial Vehicles..... | 47 |
| <i>Vzhesnievskiy M. O., Chala O. O.</i> Automatic Control of Robotic Shuttle Vehicles in Warehouse Logistics..... | 53 |
| <i>Lavrinenko V. I., Solod V. Yu., Tyshchenko V. A.</i> Modern Research in the Technologies of Abrasive Processing of Hard and Fragile Tool Materials and Determination of the Features of the Formation of the Roughness Indicators of Their Surfaces..... | 60 |
| <i>Tryshin P. R., Vnukov Yu. M., Kozlova O. B.</i> Investigation of the Self-Oscillatory System of the Cutting Process in Turning..... | 66 |
| <i>Okhrimenko O. A., Zakovorotny O. Yu., Mironenko E. V., Kamchatna-Stepanova K. V., Klochko L. V., Glushko S. S., Permyakov E. O., Fedorenko V. S.</i> Ways to Enhance the Efficiency of High-Speed Gear Machining of Hardened Large-Module Gears..... | 75 |
| <i>Mezentseva I. O., Mezentsev S. M.</i> The Influence of Physical Processes of Electric Erosion Machining of Complex Alloyed Steels on Erosion Products..... | 83 |
| <i>Yakovenko I., Permyakov O., Muzychka D., Gorbulyk V.</i> Prospects for the Development of Reverse Engineering in the Mechanical Engineering Industry..... | 89 |
| <i>Nevliudov I., Strelets R.</i> The Influence of Technological Parameters of Photopolymer Printing on the Quality Indicators of Parts..... | 98 |
| <i>Novikov F. V.</i> Refined Calculation of Cutting Temperature During Intermittent Grinding..... | 108 |
| <i>Hasanov M. I., Rudnev A. V., Kotliar O.V., Tytarenko O. V., Kulina D. V.</i> Investigation of the Influence of Diamond Wheel Grain Size on Grinding Performance..... | 117 |
| <i>Nevliudov I. Sh., Klymenko O. M., Yevsieiev V. V., Maksymova S. S.</i> Improvement of the encoding information method for pharmaceutical products qr-codes during sorting on a robotic conveyor line..... | 128 |

ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В
МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць

№ 1'(11) 2025

Відповідальний редактор

*О. О. Пермяков, д-р техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

*Зам. відповідального
редактора*

*О. О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ
«ХПІ», Україна*

Технічний редактор:

*В. С. Федоренко, аспірант НТУ «ХПІ»,
Україна*

*Відповідальний
секретар:*

*О. В. Набока, канд. техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khi.edu.ua, ukrstanko21@ukr.net

Підп. до друку 29.04.2025 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 25.
Ціна договірна.

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
2480000000079553, від 16.05.2007 р.