

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**

№ 2(6)'2022

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 2(6)'2022

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2022

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2022

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні** = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении = **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). — 126с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в 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, із приділенням особливої уваги: 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 в 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.

**Свідчення про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України**

**КВ № 24359-14199Р від 10 лютого 2020 р.**

.Мова статей – українська, російська, 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 № 409 від 17.03.2022 р.).

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://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>

Засновник

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### **Редакційна колегія**

*Відповідальний редактор:*

Пермяков О.О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Анділахай О.О., д-р техн. наук, проф., ПНТУ, Україна

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

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

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

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

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

Драган Перакович (Peraković, Dragan) -PhD, полный профессор,  
Университет Загреб, Хорватия

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

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

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

Ларшин В.П., д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Україна

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

Набока О.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Михел Балол (Балог, Михал), доцент, доктор философии,  
Технический университет Кошице, Словакия

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

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

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

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

Ступницький В.В., д-р техн. наук, проф., Львівська «Політех»,

Україна

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

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

#### **Editorial staff**

*Associate editor:*

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Andilakhai O.O., professor, PNTU, Ukraine

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Vorontsov B.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Hasanov M.I., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Dobrotvorsky S.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Dmitriev D.O., prof., KhNTU, Ukraine

Dragan Perakovich -PhD, full professor,

University of Zagreb, Croatia

Kalchenko V.V., professor, ChNTU, Ukraine

Klochko O.O., prof. NTU "KhPI", Ukraine

Kovalov V.D., professor, DDMA, Ukraine

Larshin V.P., prof., ONPU, Ukraine

Mironenko E.V., professor, DDMA, Ukraine

Naboka O.V., Ph.D. sciences, NTU "KhPI", Ukraine

Michel Ballol, Associate Professor, Doctor of Philosophy,  
Technical University of Kosice, Slovakia

Pasichnik V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Stalinsky D.V., prof., DP UkrSTC

ENERGOSTAL, Ukraine

Stepanov M.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Stupnitsky V.V., prof., Lvivska Politeha, Ukraine

Fadeev V.A., professor, PAT "FED", Ukraine

Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 3 від 29 квітня 2022р.

*МАНОВИЦЬКИЙ О.С., КЛИМЕНКО С.А., МАНОХІН А.С.*

## ПОРІВНЯННЯ ЗНОСУ ФРЕЗ З ПНТМ ПРИ ОБРОБЦІ АБРАЗИВНОГО ПОЛІМЕРНОГО КОМПАУНДУ

В статті розглядаються результати дослідження з вивчення зносу торцевих фрез, оснащених, при обробці абразивного полімерного компаунду, що складається з кварцового дрібнозернистого піску та епоксидно-діанової смоли. Показано вплив марки ПНТМ на зношування, інтенсивність зношування та стійкість торцевих фрез, оснащених надтвердими композитами. Встановлено, що превалюючий механізм зношування інструменту при обробці такого композиту – абразивне зношування. Досліджено залежності характеристик зношуваності та стійкості різального інструменту від швидкості різання.

**Ключеві слова:** торцеве фрезерування, ПНТМ, полімерний компаунд, інтенсивність зношування, стійкість різального інструменту, швидкість різання.

### O. S. MANOVITSKY, S. A. KLIMENKO, A. S. MANOKHIN REPAIR OF THE WEAR OF THE MILLS WITH PNTM WHEN PROCESSING THE ABRASIVE POLYMERIC COMPOUND

In the article, the results of the analysis of wear and tear of face milling cutters, equipped with an abrasive polymer compound, which are composed of quartz fine-grained sand and epoxy-diane resin, are shown. It has been established that the prevailing mechanism of tool wear during the processing of such a composite is abrasive wear. The reliability of the characteristics of wear and tear resistance of the cutting tool in the form of a sharpness of cutting was assessed.

Key words: end milling, PNTM, polymer compound, wear intensity, cutting tool durability, cutting speed.

**Вступ.** Значний вплив на кількісні показники, що характеризують зношувність торцевих фрез, мають властивості матеріалу, яким оснащений різальний інструмент. В зоні різання має місце циклічне термобаричне навантаження інструменту, що обумовлює досить значний вплив на зношувність і стійкість торцевих фрез. Використання абразивного полімерного компаунду (ПК), який складається з кварцового дрібнозернистого піску (80 об. %) та епоксидно-діанової смоли КДЖ-5-20 ТУ 2225-597-11131395-01 і є важкооброблюваним матеріалом з позиції абразивного впливу на інструмент, значною мірою скорочує і здешевлює експериментальні дослідження порівняльної абразивної зносостійкості різальних інструментів, оснащених різними марками полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ). Його використання дозволяє мінімізувати або виключити з розгляду такі механізми контактної взаємодії в зоні різання, як адгезійний, дифузійний і хімічний знос, що мають місце при фрезеруванні залізо-вуглецевих та інших сталей і сплавів інструментами з ПНТМ.

Надтверді композити на основі кубічного нітриду бору та синтетичного алмазу мають різну твердість та різальну здатність. Співвідношення твердості та інших фізико-механічних характеристик оброблюваних та інструментальних матеріалів дуже відчутно позначаються на зношуванні та стійкості торцевих фрез.

Найбільший вплив на працездатність різального інструменту здійснює швидкість різання, як один з найголовніших технологічних параметрів процесу різання та продуктивності фрезерування, тому визначення відповідних залежностей має надзвичайно важливе значення для вибору оптимальних значень цього показника.

Метою даної роботи було дослідження порівняльних залежностей зношувності та стійкості різального інструменту від швидкості різання для різних марок ПНТМ про торцевому фрезеруванні абразивного полімерного компаунда.

**Методика досліджень.** Обробка проводилася на універсально-фрезерному верстаті мод. 675П однозубою фрезою діаметром 150 мм, що була оснащена різальними елементами круглої форми RNMN 070300 із надтвердих композитів (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) і синтетичного алмазу [1, 2]. Режими різання були наступними: швидкість різання  $v = 3,9\text{--}12,6$  м/с, подача на зуб фрези  $S_z = 0,05$  мм/зуб, глибина різання  $t = 0,5$  мм. Величина зносу інструменту визначалася шириною фаски зносу по задній поверхні  $h_3$ , що вимірювалася інструментальним мікроскопом ММІ 2.

Стійкість торцевих фрез визначалася за методикою проведення прискорених стійкісних випробувань [3], яка дозволяє визначити інтенсивність приробітного і сталого зносу інструменту при роботі зо всіма швидкостями різання в обраному діапазоні. Для її реалізації було застосовано таку процедуру: – завдання площі поверхні, яку потрібно обробити фрезеруванням; – визначення вихідного значення зносу інструменту до першого проходу  $h_3^{K_{11}}$ ; – здійснення першого проходу інструменту зі швидкістю  $v_1$ ; – визначення значення зносу інструменту  $h_3^{K_{11}}$  після першого проходу інструменту зі швидкістю  $v_1$ ; – здійснення обробки зі швидкістю  $v_n$ ; – визначення значення зносу інструменту  $h_3^{K_{1n}}$  за першій прохід інструменту зі швидкістю  $v_n$ ; – здійснення другого проходу інструменту зі швидкістю  $v_1$ ; – визначення значення зносу інструменту  $h_3^{K_{21}}$  за другій прохід інструменту зі швидкістю  $v_1$ ; – здійснення другого проходу інструменту зі швидкістю  $v_2$ ; – визначення значення зносу інструменту  $h_3^{K_{22}}$  при другому проході інструменту зі швидкістю  $v_2$ ; – здійснення  $i$ -го проходу інструменту зі швидкістю  $v_i$ ; – визначення значення зносу інструменту  $h_3^{K_{ij}}$  при  $i$ -му проході інструменту зі швидкістю  $v_j$ .

Наведена процедура застосовувалася послідовно до тих пір, поки на кожній швидкості різання не досягався режим постійного сталого зносу  $h_3^{K_{ij}} = 0,15\text{--}0,20$  мм.

Для визначення інтенсивності зношування час кожного проходу для кожної швидкості різання розраховувався за такою формулою:

$$\tau_i^j = \frac{A_{0nji}}{B \cdot S_{i\min}^j},$$

де  $\tau_i^j$  – час, хв.  $i$ -го проходу для  $j$ -ої швидкості різання ( $i = 1-n$ ;  $j = 1-5$  у нашому випадку стійкісних випробовувань);  $A_{0nji}$  – площа обробленої поверхні для відповідного проходу, мм<sup>2</sup>;  $B$  – ширина фрезерування, мм;  $B = 0,8d_\phi$  ( $d_\phi$  – діаметр фрези, мм;  $S_{i\min}^j$  – подача за хв. для відповідного проходу з певною швидкістю, мм/хв.

Інтенсивність зношування для кожного різального елемента фрези з ПНТМ розраховувалась за формулою:

$$I_{ij} = \frac{h_{zij}^k - h_{zij}^n}{\tau_{ij}},$$

де  $I_{ij}$  – інтенсивність зношування мм/хв. для  $i$ -го проходу для  $j$ -ої швидкості різання;  $i = 1-n$ ;  $j = 1-5$  у нашому випадку стійкісних випробовувань;  $h_{zij}^k$  – значення зносу інструменту для відповідного проходу і швидкості різання, мм;  $h_{zij}^n$  – вихідне значення зносу інструменту для відповідного проходу і швидкості різання, мм; причому  $h_{zij}^n = h_{zij}^k$ .

Для визначення стійкості розраховане середнє значення величини зносу інструменту для кожної швидкості різання і кожного проходу:

$$h_{зспij} = \frac{h_{zij}^k + h_{zij}^n}{2}.$$

Стійкість фрези  $\Delta T_{ij}$ , розрахований на один прохід для  $j$ -ої швидкості різання розраховано за формулою:

$$\Delta T_{ij} = \frac{h_{зспij} - h_{зсп(i-1)j}}{2} \left( \frac{1}{I_{(i-1)j}} + \frac{1}{I_{ij}} \right)$$

де  $I_{ij}$  – інтенсивність зношування інструменту на  $i$ -ому проході для  $j$ -ої швидкості різання, мм/хв.;  $I_{(i-1)j}$  – інтенсивність зношування інструменту для попереднього переходу та  $j$ -ої швидкості різання, мм/хв.;  $h_{зсп(i-1)j}$  – середнє значення зносу інструменту для попереднього проходу і  $j$ -ої швидкості різання, мм;  $h_{зспij}$  – середнє значення зносу інструменту на  $i$ -ому проході для  $j$ -ої швидкості різання і  $j$ -ої швидкості різання, мм.

Загальна стійкість фрези на кожній швидкості різання для кожного проходу інструмента визначалась складанням стійкості на кожному проході для даної швидкості різання:

$$T_{nj} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{ij},$$

де  $T_{nj}$  – сумарна стійкість фрези на  $j$ -ій швидкості різання за  $n$  проходів, хв.;  $n$  – кількість проходів на  $j$ -ій швидкості різання.

Після визначення стійкості фрези на кожній зі швидкостей різання для різних ПНТМ в логарифмічних координатах були побудовані графіки залежності стійкості фрези від швидкості різання та визначені переваги вибору марки матеріалу інструментів з міркувань забезпечення найбільшої стійкості до абразивного зношування.

Для порівняння працездатності інструментів, оснащених різними ПНТМ, треба визначити їхню стійкість при однакових значеннях зносу різального елемента фрези по задній поверхні на етапі формування сталого зносу. З огляду на ту обставину, що критерієм допустимого використання частково зношеного інструмента при фрезеруванні більшості загартованих залізо-вуглецевих та інших важкооброблюваних сплавів є знос по задній поверхні, що дорівнює ширині фаски  $h_3 = 0,4$  мм, а умовою переходу до періода сталого зносу є значення  $h_3 = 0,15 - 0,20$  мм, приймаємо за однакове значення зносу інструментів по задній поверхні –  $h_3 = 0,3$  мм.

Згідно результатам багатьох дослідів та практики застосування ПНТМ у промисловій механообробці, стійкість таких фрез достатньо висока, а в періоді сталого зносу інтенсивність зношування – постійна. Стійкість фрез, у цьому випадку, до критерія зношування  $h_3 = 0,3$  мм визначалась алгебраїчною екстраполяцією, правомірність застосування якої доведена в [4]:

$$T_{0,3j} = \frac{(T_{nj} - T_{(n-1)j}) \cdot (0,3 - h_{спnj})}{h_{спnj} - h_{сп(n-1)j}},$$

де  $T_{0,3j}$  – стійкість фрези на  $j$ -ій швидкості різання до досягнення величини зносу по задній поверхні  $h_3 = 0,3$  мм, хв.;  $T_{nj}$  – стійкість фрези на  $j$ -ій швидкості різання за  $n$  проходів хв.;  $T_{(n-1)j}$  – стійкість фрези на  $j$ -ій швидкості різання за  $n-1$  проходів хв.;  $n$  – кількість проходів на  $j$ -ій шдкості різання;  $h_{спnj}$  – середній знос по задній

поверхні на  $n$ -му проході з  $j$ -ою швидкістю різання, мм;  $h_{cp(n-1)j}$  – середній знос по задній поверхні на  $(n-1)$ -му проході з  $j$ -ою швидкістю різання, мм.

**Результати досліджень.** На рис. 1, а, б приведено графіки залежності зносу торцевих фрез з композитами на основі кубічного нітриду бору «Киборит» та «Гексанит Р» по задній поверхні від часу обробки та швидкості різання при фрезеруванні ПК з постійно-заданим перетином зрізу. Аналіз наведеного показує, що збільшення швидкості різання суттєво інтенсифікує абразивне зношування торцевої фрези, оснащеної ПКНБ «Киборит».

Як видно з наведених результатів, залежності зносу фрез з ПКНБ від швидкості різання свідчать, що інструменти в композитом «Киборит» є більш зносостійкими у порівнянні з інструментами, оснащеними композитом «Гексанит Р». Проте, слід зазначити, що за зносостійкістю інструменти, оснащені ПКНБ, поступаються фрезам з надтвердими композитами на основі синтетичного алмазу. На рис. 1, в наведені результати досліджень стійкості інструментів, оснащених алмазно-твердомплавними пластинами (АТП). Більша зносостійкість таких інструментів при обробці абразивного матеріалу (ПК) (рис. 2, а) обумовлена більшою твердістю композиту на основі алмазу, яким оснащені фрези.

Важливою характеристикою працездатності торцевих фрез з ПНТМ є інтенсивність їх зношування в залежності від швидкості різання. За отриманими експериментальними даними вибудовано порівняльні графіки залежності інтенсивності зношування інструментів, оснащених ПНТМ (ПКНБ «Киборит», «Гексанит Р» та АТП) від швидкості різання (рис. 2)

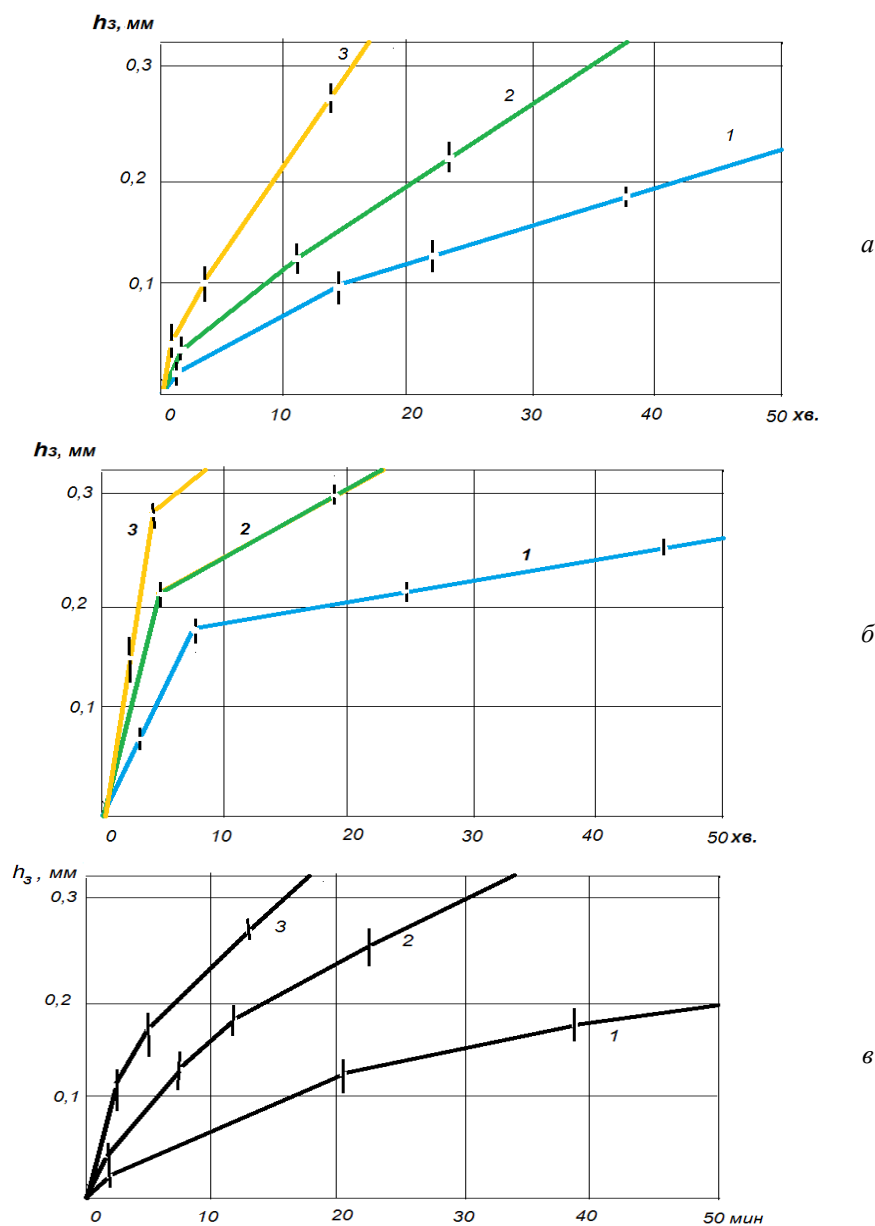


Рис. 1 – Залежність зносу торцевих фрез з ПКНБ «Киборит» (а), «Гексанит Р» (б) та АТП (в) по задній поверхні від часу обробки ( $1 - v = 3,9$  м/с;  $2 - v = 6,3$  м/с;  $3 - v = 9,8$  м/с)

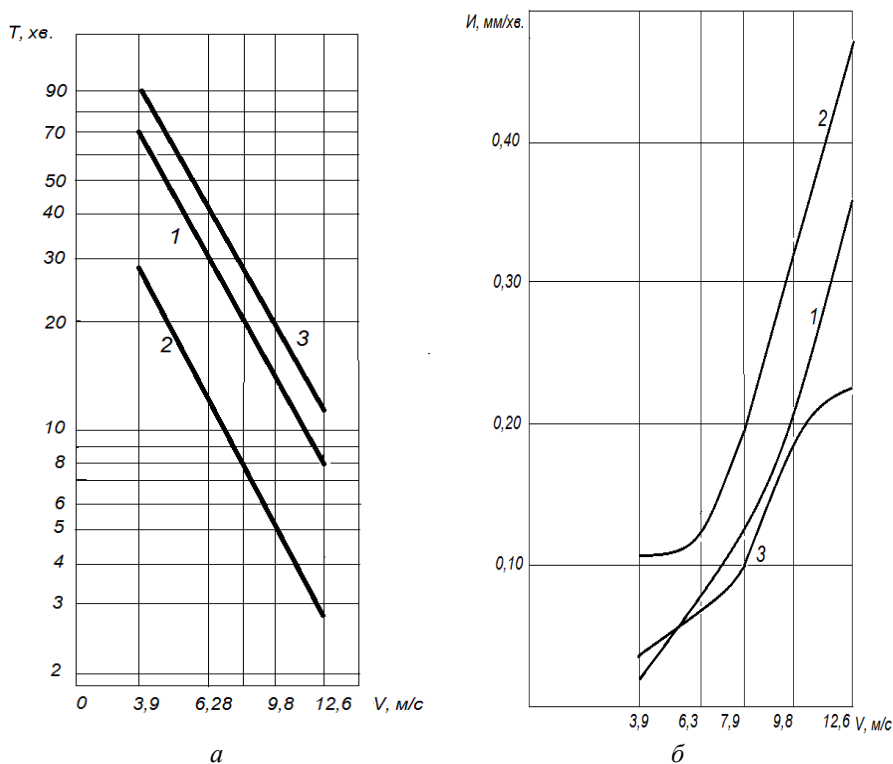


Рис. 2 – Залежність стійкості (а) та інтенсивності зношування (б) торцевих фрез із з ПНТМ «Киборит», «Гексаніт Р» (2) і АТП (3) від швидкості різання при торцевому фрезеруванні ПК ( $S_z = 0,05$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм)

З аналізу отриманих результатів можна прийти до висновку, що фреза з ПКНБ «Гексаніт Р» має більшу інтенсивність зношування у порівнянні з інструментом, оснащеним ПКНБ «Киборит», останній за цим показником є більш працездатним при обробці абразивного полімерного компаунду (кварцевий пісок – 80%, епоксидно-діанова смола КДЖ-5-20 – 20%) приблизно в півтори рази. Що стосується фрез з АТП, то цей інструмент має найвищу серед порівнюваних зносостійкість, проте на низьких швидкостях такий інструментальний матеріал зношується навіть трохи інтенсивніше, ніж фреза з ПКНБ «Киборит».

#### Список літератури

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Беженарь, Н. П. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструментов / Н. П. Беженарь, А. А. Бочечка, Г. Д. Ильницкая и др.; под общ. ред. П. А. Витязя, В. З. Туркевича – Мн. : Беларуская навука, 2021. – 337, [1] с.
3. Макаров, В. Ф. Методика прискорених стійких випробувань інструментів при різанні / Тр. Рибінський авіац. техн. ін-т // В. Ф. Макаров. – 1975. – № 3. – С. 176–183.
4. Taylor, J. The estimation of tool life equation by extrapolation / Proc. 18<sup>th</sup> Int. Mach. Tool Des. & Res. Conf. // J. Taylor. – London, 1978. – P. 379–385.

#### References (transliterated)

1. *Sintez i spekanie sverkhтверdykh materialov dlya proizvodstva instrumentov* / pod obshh. red. P. A. Vityazy, V. Z. Turkevicha – Minsk : Belarus`ka navuka, 2021. – 337, [1] s.;
2. *Instrumenty` iz sverkhтверdykh ma`terialov* / pod red. N. V. Novikova, S. A. Klimenko. – Moskva : Mashinostroenie, 2014. – 608 s.;
3. *Huang, Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning* : PhD Dissertation / Y. Huang. – Georgia : Georgia Institute of Technology, 2002.

Поступила (received) 10.04.2022.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мановицький Олександр Степанович (Manovitsky Oleksandr)** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України., 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22

**Клименко Сергій Анатолійович (Klimenko Sergiy Anatoliyovych)** – заступник директора з наукової роботи, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України., чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор, , 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>

**Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andriy Sergiyovich)** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22 <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482> УДК 621.923

**НЕЖЕБОВСЬКИЙ В.В., БЕРЕЖНИЙ Р.А., ПЕРМЯКОВ О.А., КЛОЧКО 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**

**Анотація.** Розглянуто рішення задачі вибору і призначення системи параметрів поверхневого шару циліндрових крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості на основі аналізу їх функціонального призначення і умов експлуатації очисного комбайну УКД200-500 нового покоління. При проектуванні важких редукторів очисних комбайнів УКД200-500 необхідно забезпечити експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчастих коліс (втомна міцність, зносостійкість, контактна жорсткість, надійність і точність роботи вузла і виробу в цілому. Це пов'язано з тим, що залежно від необхідних експлуатаційних властивостей повинні здійснюватися вибір матеріалів циліндричних зубчастих коліс, призначення точності розмірів і параметрів стану їх поверхневого шару. При цьому необхідно керуватися відповідними залежностями і рекомендаціями, отриманими в результаті теоретичних і експериментальних досліджень. Шумові характеристики високошвидкісних важелонагружених циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс в передачах визначається погіршенням профілю зуба.

**Ключові слова :** Системи параметрів, поверхневий шар, крупномодульні зубчасті колеса, очисні комбайни УКД200-500, ріжучі частини

**NEZHEBOVSKY V.V., BEREZHNYI R.A., PERMYAKOV O.A., KLOCHKO O.O., RYABCHENKO S.V., USTINENKO O.V.**  
**SYSTEMS OF THE PARAMETERS OF THE CONDITION OF THE WORKING SURFACES AND DIMENSIONS ACCURACY OF THE CYLINDRICAL HARDENED GEAR WHEELS OF THE CLEANING COMBINED UKD200-500 OF THE NEW GENERATION**

**Annotation.** The issues of efficiency improvement in hydrodynamic (liquid) or limit (semi-liquid) modes of friction of gears with an asymmetric profile and the effect of the liquid on tooth damage, power loss and temperature in contact, as well as the role of an elastic medium that dampens shocks and changes contact lines, are considered. In many gears, the tooth load per tooth is much higher and applied for longer periods of time. The asymmetrical shape of the tooth reflects this functional difference. In the case of asymmetric gears, the standard symmetrical toothed tool rail is modified by changing the pressure angle of one of the side surfaces. However, this simplistic approach to the design of an asymmetric transmission significantly limits the ability to maximize the performance of a wide range of possible applications of these transmissions. As the frequency of impact interactions increases, the lubricating layer of high-speed gears with an asymmetric profile ceases to respond to pressure changes, and the load value, which determines the smallest layer thickness over time, approaches the minimum stationary component of the spectrum of dynamic loads. At the same time, noise and vibration levels are slightly reduced. Therefore, in the calculations of the strength, contact endurance and seizure of high-speed gears with an asymmetric profile, the complex influence of the criterion parameters of the lubricant must be taken into account not only when determining the allowable stresses, but also when determining the amount of dynamic load amplification due to the impact interaction of the teeth.

**Keywords:** gears, asymmetric profile, power, lubricating layer, load, layer thickness, noise and vibration levels, . complex influence of criterion parameters.

**Вступ.** Рішення задачі вибору і призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс очисного комбайну УКД200-500 нового покоління (Рис. 1), що визначають їх експлуатаційні властивості повинно базуватися на ретельному аналізі функціонального призначення того або іншого вузла виробу і умов його роботи.

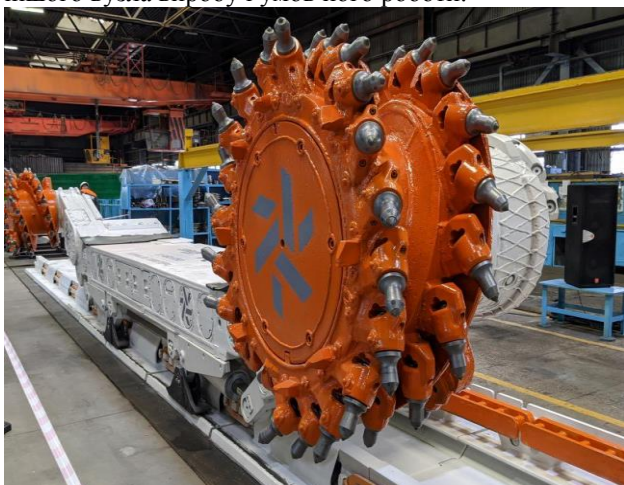


Рис. 1 - Комбайн очисний УКД200-500

**Мета роботи.** При проектуванні важких редукторів очисних комбайнів УКД200-500 необхідно забезпечити експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчастих коліс (втомна міцність, зносостійкість, контактна жорсткість, надійність і точність роботи вузла і виробу в цілому.

© В.В. Нежебовський, Р.А. Бережний, О.А. Пермяков, О.О. Клочко, С.В. Рябченко, О.В. Устиненко, 2022



Це пов'язано з тим, що залежно від необхідних експлуатаційних властивостей повинні здійснюватися вибір матеріалів циліндричних зубчастих коліс, призначення точності розмірів і параметрів стану їх поверхневого шару. При цьому необхідно керуватися відповідними залежностями і рекомендаціями, отриманими в результаті теоретичних і експериментальних досліджень.

Так, при необхідності забезпечення необхідних значень контактної жорсткості, коефіцієнта тертя, зносостійкості, межі витривалості можна користуватися залежностями, приведеними в [1, 6, 8, 11]

**Основна частина.** Параметри стану робочих поверхонь і точність розмірів необхідно призначати з урахуванням їх функціонування на «робочих осях» (швидкості відносного ковзання, реверсивності зубчастої передачі, умов навантаження, наявності мастила, температурні умови експлуатації і тому подібне). Зазвичай проєктований вузол зубчастих передач привідних ріжучої частини 1 (Рис. 2) повинен задовольняти декільком експлуатаційним показникам [1, 2, 3, 4, 8].

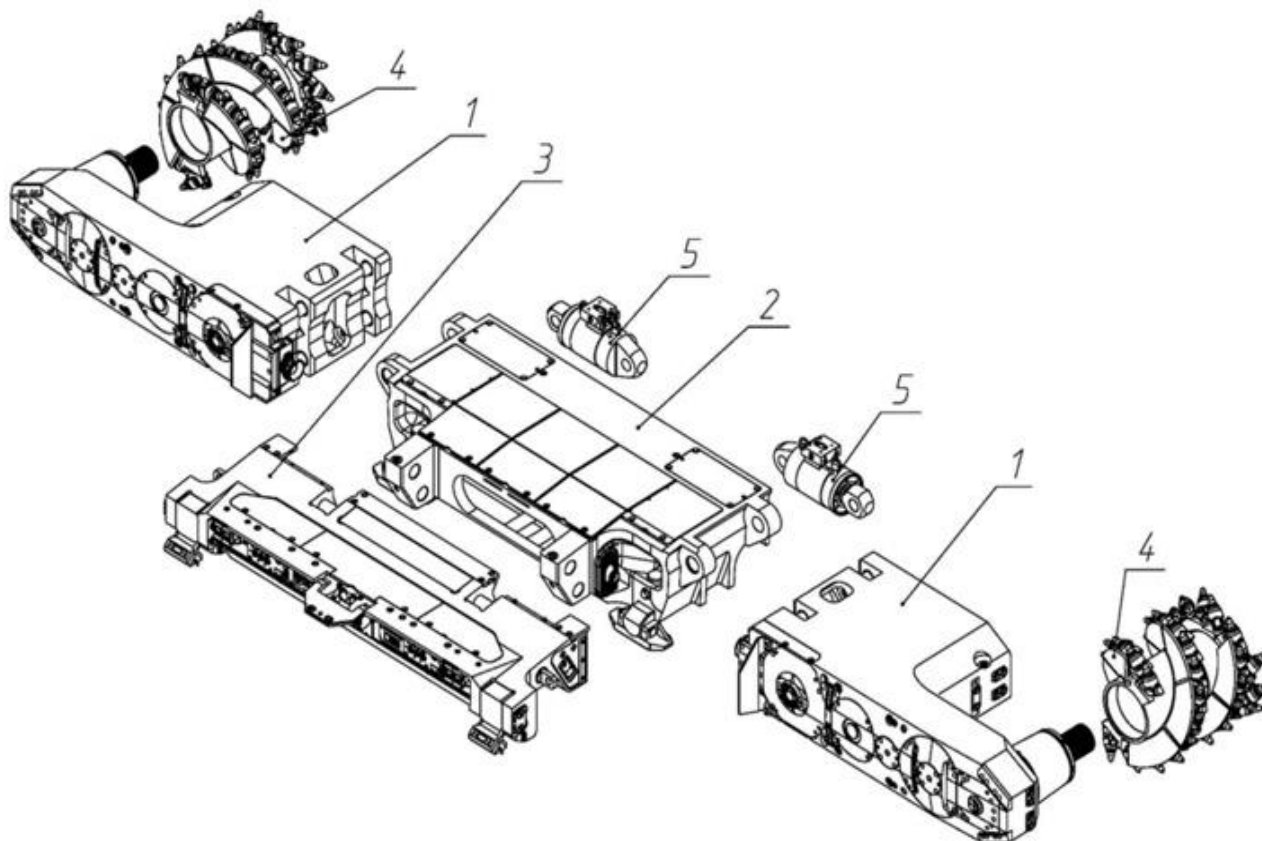


Рис. 2 – Компонівка очисного комбайна УКД200-500

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

Ріжуча частина очисного комбайна УКД200-500 (рис.3) є уніфікованою, що дозволяє встановлювати її як з лівого, так і з правого боку рами. Ріжуча частина є триступінчастим редуктором з електродвигуном. Кожен ступінь редуктора розташований в окремій герметичній камері, захищеній від проникнення абразивних частинок.

У кожній камері є масляна ванна для змащування підшипників та зубчастих передач. Контроль рівня мастильного матеріалу в масляних камерах проводиться за індикаторами рівня мастила, розташованим із завальної сторони редуктора [5, 7, 11].

У корпус редуктора вбудована триконтурна система охолодження із розділеними паралельними потоками. Охолодження швидкохідного ступеня циліндричної прямозубої передачі здійснюється шляхом вбудованого радіатора, планетарного ступеня за допомогою одноконтурної сорочки охолодження, тихохідного ступеня прямозубої циліндричної передачі через виконані в корпусі канали охолодження.

Між другим і третім щаблем редуктора розташований зрізний елемент, у вигляді шліцевого валу, що виключає аварійний вихід з ладу елементів редукторної групи. Згладжування динамічних пікових навантажень здійснюється торсіонним валом, розташованим усередині валу ротора електродвигуна фірми DAMEL. У двигун також вбудований механізм вимкнення різальної частини.



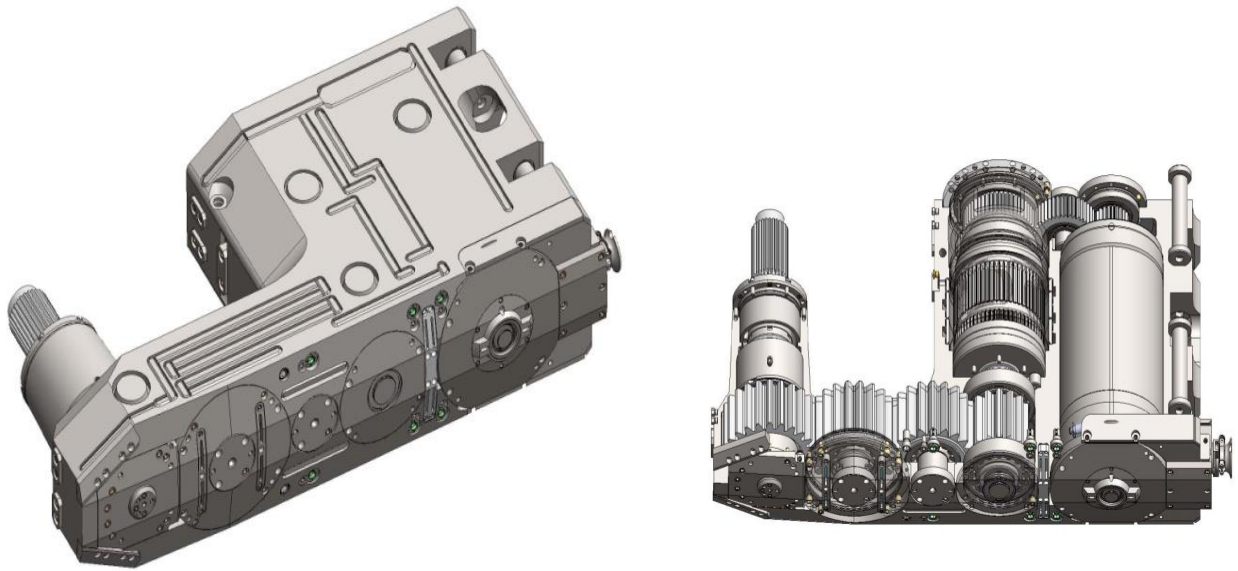


Рис. 3 – Ріжуча частина очисного комбайна УКД200-500

Для забезпечення плавності зубчастих передач необхідно отримати граничні відхилення кроку зачеплення (Рис. 4) відповідно до вимог ГОСТ1643-81.

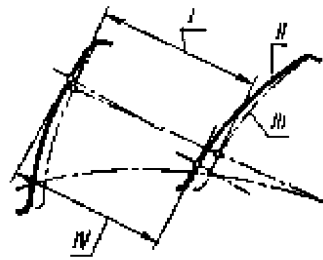


Рис. 4 – Граничні відхилення кроку зачеплення

Верхнє відхилення -  $+f_{pb}$ ; Нижнє відхилення -  $-f_{pb}$ ; I - номінальний крок зачеплення; II - дійсний профіль зуба; III - номінальний профіль зуба; IV - дійсний номінальний крок

Шумові характеристики високошвидкісних важконагружених циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс [1, 4, 5, 11]. в передачах визначається погрішністю профілю зуба (Рис. 5).

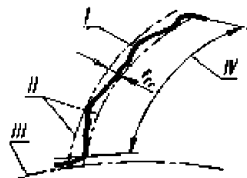


Рис. 5 – Погрішність профілю зуба

I - дійсний торцевий профіль зуба; II - номінальні торцеві профілі зуба; III - основа коло; IV - межі активного профілю зуба

Параметри ізносостійкості зубчастих передач, довговічності забезпечуються параметрами відхилення допуску на напрями зуба  $F_{\beta}$  (Рис. 6).

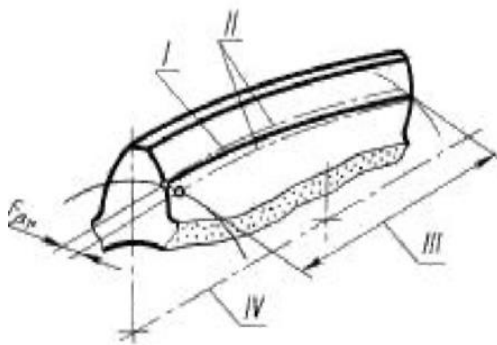


Рис. 6 – Погрішність профілю зуба  $F_{\beta}$

I - дійсна ділильна лінія зуба; II - номінальна ділильна лінія зуба; III - ширина зубчастого вінця; IV - робоча вісь зубчастого колеса

З вищевикладеного виходить, що при рішенні задачі раціонального призначення системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс необхідно зробити значне число обчислень по відповідних теоретичних або експериментальних залежностях за допомогою розрахункових керівників програм, що дозволить забезпечити точність результатів розрахунку.

Структурна схема рішення задачі показана на Рис. 7. На основі спільного аналізу умов нормальної експлуатації (блок 1) і технічних умов на виготовлення циліндричних зубчастих коліс (блок 2) здійснюється визначення необхідних експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс і допустимих меж їх зміни (блок 3). Наприклад, якщо сумарне зближення поверхонь, що сполучаються, під навантаженням при тертіковзанні за увесь термін їх служби не повинне перевищувати 16 - 20 мкм, а величина контактного зближення поверхонь під навантаженням за рахунок пластичних і пружних деформацій їх поверхневих шарів складає 5 - 6 мкм, то це означає, що знос циліндричних зубчастих коліс, що сполучаються, за увесь термін їх служби не повинен перевищувати 10 - 14 мкм. Знаючи термін служби очисного комбайна УКД200-500 та рахунок фактичного часу роботи

Ріжучої частини 1 (Рис. 2) за увесь термін служби  $T$ , визначається допустима інтенсивність зношування з'єднання  $J = (10 \dots 14) / T$ , мкм/с [1, 4, 5].

Таким чином визначаються експлуатаційні властивості циліндричних зубчастих коліс ріжучої частини очисного комбайна УКД200-500 і допустимі межі їх зміни, лімітуючі надійність роботи силових елементів редукторної групи 15000 годин; можливість застосування винесеної системи подачі з тяговим зусиллям 300 кН; ріжучі частини комбайна обладнані індикаторами рівня мастила, розташовані із завального боку; застосована вдосконалена система заправки комбайна мастильними матеріалами, що виключає попадання в редуктори абразивних частинок. Перехід від блоків 1 і 2 до блоку 3 є неформалізованим, т. е. він не піддається алгоритмізації. Це означає, що на цьому етапі проектування дуже важливими чинниками є наявні статистичні дані по експлуатації прототипів проєктованих вузлів зубчастих передач ріжучої частини очисного комбайна УКД200-500.

Після того, як визначені необхідні експлуатаційні властивості проєктованих циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс і допустимі межі їх зміни, здійснюється пошук відповідних теоретичних або експериментальних залежностей, які характеризують кількісну сторону взаємозв'язку між цими експлуатаційними властивостями, фізико-механичними властивостями матеріалів контактуючих циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс, параметрами стану поверхні і умовами функціонування (блок 4).

У блоці 5 здійснюється вибір матеріалу циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс за фізико-механичними властивостями, розрахунок точності розмірів і параметрів стану робочих поверхонь циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості в допустимих межах їх зміни, т. е. підбираються значення аргументу, що задовольняють заданій функції. Рішення цієї задачі ускладнюється тією обставиною, що на аргумент накладаються обмеження, оскільки фізико-механичні властивості матеріалів, параметри стану реальних поверхонь і точність розмірів не можуть змінюватися в нескінченних межах. Тому у ряді випадків спільне забезпечення декількох експлуатаційних властивостей може виявитися неможливим. При цьому необхідно вибрати найбільш важливі з них або розширити допустимі межі їх зміни і повторити розрахунок.

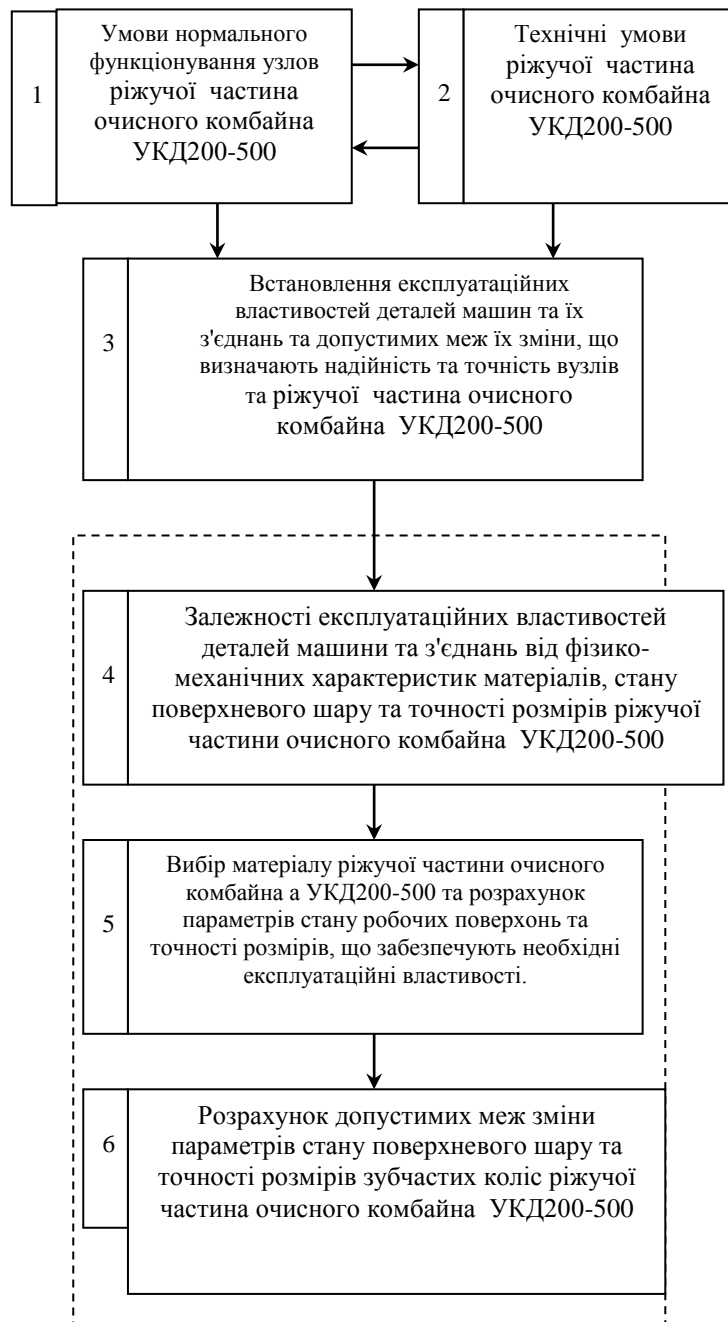


Рис. 7– Структурна схема завдання конструктора при проектуванні ріжучої частина очисного комбайна УКД200-500

Необхідно відмітити, що чим ширше допустимі межі зміни експлуатаційних властивостей, тим легше вирішити завдання за визначенням необхідного матеріалу, точність розмірів і параметрів стану робочих поверхонь циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс [1, 4, 5, 11]. Вичислені параметри стану поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс повинні знаходитися в діапазоні технологічних можливостей, т. е. додатково накладаються технічні обмеження;

$$\left. \begin{aligned} R_{min} \leq Ra \leq R_{max} \\ W_{zmin} \leq W_z \leq W_{zmax} \\ k_{min} \leq k \leq k_{max} \\ \rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Враховуючи це, слід обґрунтовано визначити допустимі межі зміни експлуатаційних властивостей поверхонь і не прагнути до їх штучного звуження.

У блоці 6 здійснюється розрахунок допустимих меж зміни параметрів стану поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс і точності розмірів з урахуванням забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей в заданих межах їх зміни. Таким чином, чим вузьчий визначені допустимі інтервали зміни експлуатаційних властивостей у блоці 3, тим вже виходять розрахункові допустимі межі зміни параметрів поверхневого шару і точності розмірів циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс (блок 6).

Отже, рішення задачі, починаючи з блоку 4, є достатньою мірою формалізованим, тобто може бути алгоритмізовано і з успіхом здійснено на ПК. З аналізу отриманих рівнянь для розрахунку експлуатаційних властивостей циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс [1,4] можна визначити вектор постійних параметрів, використовуваних при рішенні задачі і незалежних параметрів, що оптимізуються;

$$\vec{K} = (\delta\delta Y, \Gamma, M, P, \mu, \sigma T) \quad (2)$$

$$\vec{X} = (RRa1, Ra2, \rho1, \rho2, w \square 1, w \square 2, \dots) \quad (3)$$

Система рівнянь чинників контактної взаємодії, технічних обмежень, постійних параметрів, що оптимізуються, є початковою для розробки алгоритму у блоках 5 і 6.

Блок-схема оптимізаційного алгоритму за розрахунком параметрів стану поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс по одній з експлуатаційних властивостей, моменту, що зокрема крутить, приведена на мал. 4. У цьому алгоритмі генерація випадкових значень незалежних змінних робиться з урахуванням обмежень (1). Далі здійснюється розрахунок передаваного моменту, що крутить, а результат розрахунку порівнюється з попереднім значенням; запам'ятовується значення моменту, найбільш близьке до потрібного, а також величини параметрів стану поверхні, при яких воно отримане.

Ця частина алгоритму здійснюється по черзі для кожного навантаження із заданими значеннями передаваних моментів, що крутять. Після визначення оптимальних значень параметрів стану поверхонь (одного або декількох) і передаваних моментів, що крутять, робиться розрахунок допусків на параметри стану поверхневого шару залежно від допусків на передаваний момент, що крутить. Функції блоку 5 можна структурно розмежувати на вибір матеріалів і визначення точності розмірів і параметрів стану поверхневого шару, зв'язавши їх з функціями блоку 6, тобто робити одночасно визначення усіх параметрів поверхні і меж їх зміни [1, 4, 5, 11].

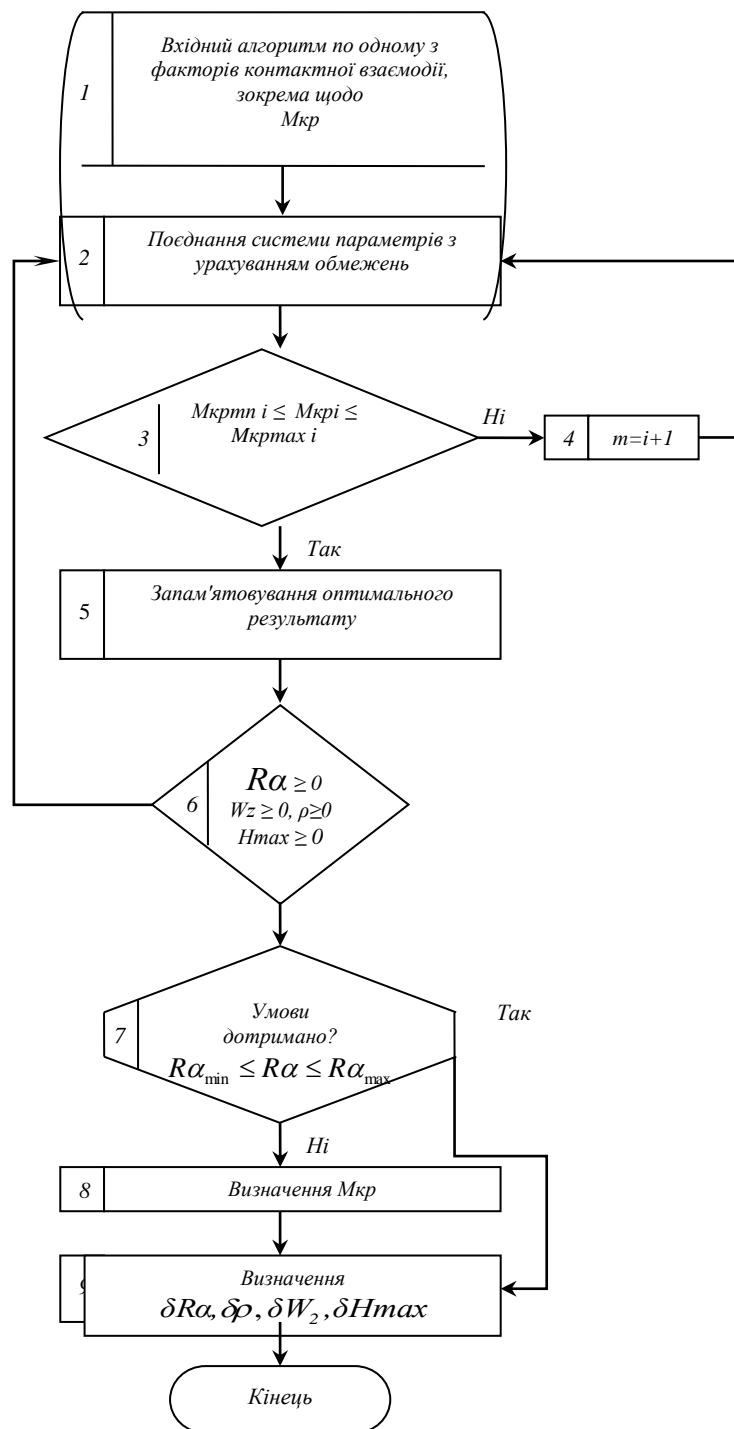


Рис. 8. Блок-схема розрахунку оптимальних параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних крупномодульних зубчастих коліс ріжучої частина очисного комбайна а УКД200-500 з урахуванням системи параметрів, що характеризують стан їх поверхневого шару

**Висновки.** Таким чином визначають надійність і довговічність ріжучої частина очисного комбайна а УКД200-500 по втомній міцності, износоустойчивості, довговічності циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс при використанні комплексних параметрів для оцінки стану поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс, зокрема для зносостійкості.

На цьому завершується рішення задачі по обґрунтованому вибору матеріалів, призначенню параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс, що забезпечують задані експлуатаційні властивості, а отже, надійність і точність роботи експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс ріжучої частина очисного комбайна у УКД200-500.

#### Список літератури

1. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Клочко [и др.]; Науч. Ред.: А.А.Пермяков; ВолГУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с., ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.
2. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.
3. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – С-Пб.: Профессия, 2007. – 832 с.
4. Тимофеев Ю.В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упрочненного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко // Вісник Національного технічного університету КПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Київ: НТУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293.
5. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // X.: НТУ «ХПИ», 2016. □ 400 с. □ На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.
6. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н., Нежебовский В.В. Определение оптимальных режимов резания при зубошлифовании с учетом ограничения по температуре шлифования. – Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Ч. 1. - Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. - С. 36-40.
7. Новиков Ф.В. Повышение качества и производительности обработки на операциях зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров / Ф.В. Новиков, А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Труды 17-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. - Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2011.-С. 3-13.
8. Новиков Ф.В. Технологические обеспечения качества обработки на операциях зубошлифования / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Вюник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. - “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. - 2011. - Вип. 118.-С. 21-32.
9. Новиков Ф.В. Определение оптимальных условий механической обработки деталей по температурному критерию / Ф.В. Новиков, И.В. Тершиков, В.В. Нежебовский В.В. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 13-го Международного научно-технического семинара, 18- 22 февраля 2013 г., г. Свалява. - Киев : АТМ Украины, 2013. - С. 144- 147
10. Новиков Ф.В. Математическая модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупш // Вісник НТУ “ХПИ”. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. - X.: НТУ “ХПИ”. - 2013. - № 5 (979). - С. 199-210
11. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии изготовления зубчатых колес редукторов приводов шахтных конвейеров / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский, И.В. Гершиков / Труды 18-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. - Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2012. - С. 59-68.

#### References (transliterated)

1. Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh koles [Tekst] / N.V. Kravcov, Yu.V. Timofeev, A.A. Klochko [i dr.]; Nauch. Red.: A.A. Permyakov; VolGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; - (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
2. Inzheneriya poverkhnostey detaley / Koll. avt.; pod red. A.G. Suslova. M.: «Mashinostroenie», 2008. – 320 s.
3. Tekhnologiya proizvodstva i metody obespecheniya kachestva zubchatykh koles i peredach / Pod obshh. red. V. E. Starzhinskogo, M. M. Kane. – S-Pb.: Professiya, 2007. – 832 s.
4. Timofeev Yu.V. Nauchny'e predposyl'ki opredeleniya uslovij formirovaniya velichin uprochnennogo sloya pri formoobrazovanii krupnomodul'nykh zubchatykh koles / Yu. V. Timofeev, A. N. Shelkovej, A. A. Klochko //Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu KPI: zb. nauk. pr. Tematichnij vipusk: Problemi mekhanichnogo privodu. – Kyiv: NTU KPI, 2012. – # 64. – S. 288–293.
5. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mashinostroitel'nogo proizvodstva v 2-kh tomakh, T. 1: ucheb. posobie / A.V. Belovol, A.A. Klochko, E.V. Naboka, A.O. Skorkin, A.N. Shelkovej. pod redakciej A.N. Shelkovogo // Kh.: NTU «KhPI», 2016. □ 400 s. □ Na russkom yazy'ke. ISBN 978-966-593-749-4.
6. Novikov F.V., Koval'chuk A.N., Nezhebovskij V.V. Opredelenie optimal'nykh rezhimov rezaniya pri zuboshlifovanii s uchetom ograniчениya po temperature shlifovaniya. – Sovremenny'e instrumental'ny'e sistemy, informacziorny'e tekhnologii i innovaczi: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.: v 2 ch. Ch. 1. - Yugo-Zap. gos. un-t. Kursk, 2011. - S. 36-40.
7. Novikov F.V. Povy'shenie kachestva i proizvoditel'nosti obrabotki na operacziyakh zuboshlifovaniya zubchatykh koles privodov shakhtnykh konvejerov / F.V. Novikov, A.N. Koval'chuk, V.V. Nezhebovskij // Trudy 17-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferenczii. Fizicheskie i komp'yuterny'e tekhnologii. - Khar'kov: KhNPK “FE'D”, 2011.-S. 3-13.
8. Novzhov F.V. Tekhnopolchne zabezpechennya yakosti obrobki na operashhyakh zuboshlfuvannya / F.V. Novshov, V.V. Nezhebovs'kij // Vyunik Kharyuvs'kogo nashhonal'nogo tekshshchnogo ushversitetu ssh's'kogo gospodarstva iMeHi Petra Vasilenka. - “Tekshshchnij servyu APK, tekhnika ta tekhnologii u ssh's'kogospodars'komu mashinobuduvannya”. - 2011. - Vip. 118.-S. 21-32.
9. Novikov F.V. Opredelenie optimal'nykh uslovij mekhanicheskoy obrabotki detaley po temperaturnomu kriteriyu / F.V. Novikov, I.V. Tershnikov, V.V. Nezhebovskij V.V. // Sovremenny'e problemy proizvodstva i remonta v promy'shlennosti i na transporte : Materialy 13-go Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnichejskogo seminar, 18- 22 fevralya 2013 g., g. Svalyava. - Kiev : ATM Ukrainy, 2013. - S. 144- 147
10. Novzhov F.V. Matematichna model' viznachennya shorstkosti poverksh pri abrazivnsh obrobsh / F.V. Novzhov, V.V. Nezhebovs'kij, V.G. Shkurupsh // Visnik NTU “KhSh”. Zbl'mik naukovikh prac'. Seriya: Matematichne modelyuvannya v tekhnncz ta tekhnolopyakh. - X.: NTU “KhSh”. - 2013. - # 5 (979). - S. 199-210
11. Novikov F.V. Povy'shenie e'ffektivnosti tekhnologii izgotovleniya zubchatykh koles reduktorov privodov shakhtnykh konvejerov / F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskij, I.V. Gershikov / Trudy 18-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferenczii. Fizicheskie i komp'yuterny'e tekhnologii. - Khar'kov: KhNPK “FE'D”, 2012. - S. 59-68.

Поступила (received) 11.03.2022.

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Нежебовський Володимир Вікторович (Nezhebovs'kyj Volodymyr)** – заступник головного інженера АТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря», к.т.н., м. Харків, Україна;, e-mail: Nezhebovsky.Vladimir@corum.com

**Бережний Роман Анатолійович (Berezhnyi Roman)** - головний конструктор - начальник СКБ АТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря», к.т.н., м. Харків, Україна;, e-mail: berezhnoy.roman@corum.com

**Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Alexander)**– завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», д.т.н., проф. м.Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; [perm\\_a@i.ua](mailto:perm_a@i.ua), \_ORCID: 0000-0002-9589-0194

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2841-9455

**Рябченко Сергій Васильович (Riabchenko Serhii)** – старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля нан україни, кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), старший науковий співробітник (Senior Researcher). [s.riabchenko@ukr.net](mailto:s.riabchenko@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4599-9810>

**Устиненко Олександр Віталійович (Ustinenko Oleksandr)** – професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів и машин Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», к.т.н., с.н.с., [ustin1964@gmail.com](mailto:ustin1964@gmail.com).



**МАЙБОРОДА В. С., ДЖУЛІЙ Д. Ю., БЕСАРАБЕЦЬ Ю. Й., СЛОБОДЯНЮК І. В.,  
ЗАСТАВСЬКИЙ К. О.**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ЛОБОВОГО ОПОРУ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ В КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ**

Розроблено методику та виконано систематичні дослідження по вимірюванню сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті (МАІ) при обробленні циліндричних деталей діаметром 16 мм і висотою 30 мм, виготовлених з пара-, феро- та діамантних матеріалів, в кільцевій камері діаметром 200 мм з робочою висотою 30 мм при швидкостях оброблення в діапазоні 1–3 м/с, магнітній індукції в робочих зонах, що змінюється в діапазоні 0,2–0,25 Тл. Показано, що сили опору суттєво залежать від магнітних та реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту. При магнітно-абразивному обробленні (МАО) лобовий опір для немагнітних деталей практично однаковий і не залежить від швидкості оброблення, а зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах місце його лінійне зростання. Коефіцієнт збільшення лобового опору, що визначається магнітним полем, для порошоків розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, що сили лобового опору при МАО ферромагнітних зразків змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н та в 1,2–1,45 разів вищі, ніж для немагнітних деталей, що пов'язано з дією сил магнітного походження, особливостями взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями та формуванням зон заклинювання між поверхнею деталі та полюсними наконечниками кільцевої ванни. Встановлено періодичну зміну сил опору МАІ оброблюваної деталі поблизу їх середнього значення, а при підвищених швидкостях МАО понад 2–2,5 м/с зафіксовані нестійкості, пов'язані з періодичним зменшенням амплітуд коливань сил опору внаслідок перебудови, зміни розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умов їх взаємодії з оброблюваними поверхнями.

**Ключові слова:** магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, сила лобового опору, магнітна індукція, кільцева робоча зона.

**МАЙБОРОДА В. С., ДЖУЛІЙ Д. Ю., БЕСАРАБЕЦЬ Ю. Й., СЛОБОДЯНЮК І. В., ЗАСТАВСЬКИЙ К. О.  
ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МАГНИТНО-АБРАЗИВНОМ  
ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ**

Разработана методика и выполнены систематические исследования по измерению сил лобового сопротивления, оказываемого магнитно-абразивным инструментом (МАИ) обрабатываемым цилиндрическим деталям диаметром 16 мм и высотой 30 мм, изготовленным из пара-, ферро- и диамагнитных материалов, в кольцевой камере диаметром 200 мм с рабочей высотой 30 мм при скоростях обработки в диапазоне 1–3 м/с, магнитной индукции в рабочих зонах изменяющейся в диапазоне 0,2–0,25 Тл. Показано, что силы сопротивления существенно зависят от магнитных и реологических свойств магнитно-абразивного инструмента. При магнитно-абразивной обработке (МАО) лобовое сопротивление для немагнитных деталей практически одинаковые и не зависят от скорости обработки, а с увеличением магнитной индукции в рабочих зонах имеет место его линейный рост. Коэффициент увеличения лобового сопротивления, определяемый магнитным полем, для порошков с размером частиц 400/315 мкм составляет 960 Н/Тл, а для размера 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, что силы лобового сопротивления при МАО ферромагнитных образцов изменяются в диапазоне от 160 до 220 Н и в 1,2–1,45 раз выше, чем для немагнитных деталей, что связано с действием сил магнитного происхождения, особенностями взаимодействия структурных элементов МАИ с обрабатываемыми поверхностями и формированием зон заклинивания между поверхностью детали и полюсными наконечниками кольцевой ванны. Установлено периодическое изменение сил сопротивления МАИ обрабатываемой детали вблизи их среднего значения, а при повышенных скоростях МАО более 2–2,5 м/с зафиксированы неустойчивости, связанные с периодическим уменьшением амплитуд колебаний сил сопротивления в результате перестройки, изменения размеров и объемов структурных элементов магнитно-абразивного инструмента и условий их взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивный инструмент, сила лобового сопротивления, магнитная индукция, кольцевая рабочая зона.

**MAIBORODA V. S., DZHULII D. Yu., BESARABETS Yu. Jo., SLOBODIANIUK I. V., ZASTAVSKIY K. O.  
INVESTIGATION OF THE DRAG FORCES ARISING IN THE MAGNETO-ABRASIVE TOOL DURING THE FINISHING OF  
CYLINDRICAL PARTS IN THE ANNULAR BATH**

The method has been developed and systematic studies have been carried out to measure the drag forces, that exerted by a magneto-abrasive tool on machined cylindrical parts with a diameter of 16 mm and the height of 30 mm, made of para-, ferro- and diamagnetic materials, in an annular working zone with the diameter of 200 mm with the working height of 30 mm at machining speeds in the range of 1 - 3 m / s, magnetic induction in the working areas varying in the range of 0.2 - 0.25 T. It is shown that the drag forces significantly depend on the magnetic and rheological properties of the magneto-abrasive tool. During magneto-abrasive finishing (MAF), the drag force for non-magnetic parts is almost the same and does not depend on the machining speed, and with an increase in magnetic induction in the working areas, its linear growth takes place. The coefficient of magnification of drag force determined by the magnetic field, for powders with a particle size of 400/315 μm is 960 N/T, and for a size of 200/100 μm it is 720 N/T. It is shown that the drag forces during the MAF of ferromagnetic parts vary in the range from 160 to 220 N and are 1.2–1.45 times higher than for non-magnetic parts, which is due to the action of forces of magnetic origin, the features of the interaction of structural elements of MAT with machined surfaces and the formation of blocking up zones between the surface of the part and the pole pieces of the annular bath. The periodic change in the drag forces of the MAT of the workpiece was established near their average value, and at elevated MAF speeds of more than 2–2.5 m/s, instabilities were recorded associated with a periodic decrease in the oscillation amplitudes of the drag forces as a result of rearrangement, changes in the dimensions and volumes of the structural elements of the magneto-abrasive tool and the conditions of their interaction with the machined surfaces.

**Keywords:** magneto-abrasive finishing, magneto-abrasive tool, drag force, magnetic induction, annular working area

**Вступ.** Ефективність процесу магнітно-абразивної обробки (МАО) в умовах кільцевого розташування робочих зазорів та слабких магнітних полів у них (магнітна індукція в зонах оброблення не перевищує 0,5 Тл) істотно залежатиме від сил, величина яких визначатиметься швидкістю та траєкторією переміщення деталей в магнітно-абразивному інструменті (МАІ), що формується в процесі МАО, величини магнітного поля в робочих зазорах, характеристик застосовуваних магнітно-абразивних порошоків і безпосередньо властивостей самої деталі. Зазначені фактори безпосередньо визначають особливості формування та переформування МАІ в процесі МАО, силами опору, які спричиняє МАІ деталям, які рухаються. Саме ці сили дозволять встановити реальні значення сил, з якими здійснюється притиснення окремих частинок та їх груп до оброблюваних поверхонь. Дослідження характеру зміни зазначених сил для процесу МАО у кільцевій ванні залежно від технологічних режимів оброблення практично відсутні. Окремі результати, отримані в результаті непрямих досліджень та розрахунків представлені в [1, 2]. В останні роки виконано теоретичний аналіз кінематичних особливостей процесу МАО реальних деталей в кільцевій робочій зоні, який дозволив встановити енергетичні параметри, виражені через інтегральні інтенсивності оброблення різних ділянок робочих поверхонь реальних виробів [3 – 6]. Отримані результати розрахунків дозволяють виконати орієнтовну відносну оцінку сил, що діють на різні ділянки поверхонь деталей. Але при цьому не враховуються характеристики магнітно-абразивних порошоків, величина магнітного поля в робочих зазорах, магнітні властивості матеріалу оброблюваних деталей, особливості контактної взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями, що проявляється в структуруванні МАІ в квазістабільні утворення у вигляді конусоподібних стовпчиків і веретеніподібних формувань [1, 2, 7].

Отримання даних про реальні сили опору переміщенню деталей у МАІ при МАО безсумнівно є актуальною задачею, вирішення якої дозволить не тільки визначити сили, з якими МАІ діє на оброблювані поверхні, а й ідентифікувати особливості формування МАІ. Складність вирішення цієї задачі полягає в тому, що відсутні методики вимірювання реальних сил опору, а запропоновані раніше базуються на аналізі непрямих характеристик, які, згодом, з певними припущеннями перераховувалися і в ряді випадків не завжди відповідали дійсності [2, 8 – 10]. При цьому необхідно розділяти дію сил тангенціального та нормального походження [11]. Дослідження тангенціальних сил, що виникають у кільцевих зонах оброблення залежно від швидкості руху деталей, магнітного поля, застосовуваного магнітно-абразивного порошку, виконані за модифікованою методикою, описаною в [1, 12] для феро-, пара- та діамантних зразків наведені в [13]. Мали місце окремі спроби вимірювання сил нормального опору, які спричиняє МАІ магнітним зразкам, що рухаються в кільцевій ванні в умовах слабких магнітних полів. Проте як систематичних досліджень, так і налагодженої методики вимірювання зазначених сил не наводилося.

**Мета роботи.** Розроблення методики вимірювання сил нормального походження – сил опору, які спричиняє МАІ, що формується в кільцевій робочій зоні, рухомим деталям, виготовленим з пара-, феро- та діамантних матеріалів та дослідження впливу на зазначені сили швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни, магнітної індукції в робочих зазорах, типу магнітно-абразивного порошку, його розмірів та форми частинок.

Для вимірювання сил нормального опору використовували динамометричний елемент у вигляді балки спеціальної конструкції з тензодатчиками, що дозволяє фіксувати в реальному часі зусилля в діапазоні 0 – 400 Н. Динамометричний елемент жорстко закріплювався в спеціальній оправці, встановленій на головці установки типу кільцева ванна [1, 3, 10]. Спеціальна оправка забезпечує можливість повороту динамометричного елемента із закріпленням на ньому досліджуванім зразком навколо вертикальної осі та контрольоване радіальне переміщення. Тарування пристосування у зборі виконували шляхом прикладання до досліджуваного зразка навантажень, що імітують дію МАІ в процесі МАО. Вектор прикладеного контрольованого навантаження співпадав із вектором обертання навколо осі кільцевої ванни. Сигнал з динамометричного елемента реєструвався, оброблявся та передавався на комп'ютер, частота виконання вимірювань становила 10 Гц. Отримана інформація записувалася на комп'ютері в txt-файл, який в подальшому конвертували у формат, придатний для подальшого аналізу.

Вимірювання сил опору, що виникають з боку МАІ в процесі МАО оброблюваної деталі, виконували на зразках, виготовлених із трьох типів матеріалів: феромагнітної сталі 40Х13, парамагнітних сплавів алюмінію – Д16Т та титану – ВТ 8 та діамантної бронзи БрОц. Оброблення виконували в кільцевій камері діаметром 200 мм з шириною робочого зазору 35 мм та висотою 30 мм. В якості контрольних зразків використовували циліндричні деталі діаметром 16 мм і висотою 30 мм. Оброблення виконували магнітно-абразивними порошками двох типів – Полімам-М з округлими нерівновісними частинками розміром 200/100 мкм та 400/315 мкм, та Феромап – осколковими рівновісними частинками з аналогічними розмірами [1, 12, 14]. Варіювали швидкість обертання деталей навколо осі кільцевої ванни в діапазоні 100 – 300 об/хв, що відповідає лінійній швидкості МАО – 1 – 3 м/с, магнітною індукцією у робочій зоні у діапазоні 0,2 – 0,25 Тл. В кожному циклі вимірювань при фіксованих значеннях швидкості обертання та магнітної індукції здійснювали запис не менше 300 показань, що передавались з вимірювального динамометричного елемента. Отримані результати обробляли та визначали середню величину сили опору, отриману за цикл оброблення. Результати вимірювань середніх значень сил опору в залежності від швидкості руху в кільцевій ванні при різних фіксованих значеннях магнітної індукції при МАО немагнітних матеріалів – бронзи, сплавів титану та алюмінію практично не відрізняються один від одного. Враховуючи зазначене вище, подальший аналіз результатів вимірювань доцільно проводити за усередненими значеннями, отриманими для пара- і діамантних матеріалів. Отримані усереднені результати представлені для чотирьох магнітно-абразивних порошоків на рис. 1. Встановлено, що зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах має місце лінійне зростання сил опору. Коефіцієнт збільшення сил опору для порошоків з розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Це пов'язано зі збільшенням сил магнітного походження, які безпосередньо визначають жорсткість МАІ, його підвищений опір до зміни форми при МАО. Важливо відзначити, що при обробленні порошком Полімам-М сили

опору, як правило, вище в 1,2 – 1,3 рази, ніж при MAO порошком Феромап. Цей факт можна пояснити кращими магнітними та реологічними властивостями MAI, сформованого з магнітно-абразивного порошку Полімам-М [1]. Зміни середніх сил опору в залежності від швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни, отримані при MAO порошками розміром частинок 200/100 мкм несуттєві і знаходяться в діапазоні 6 – 9 Н і можуть бути віднесені до похибок пов'язаних з виконанням процесу MAO.

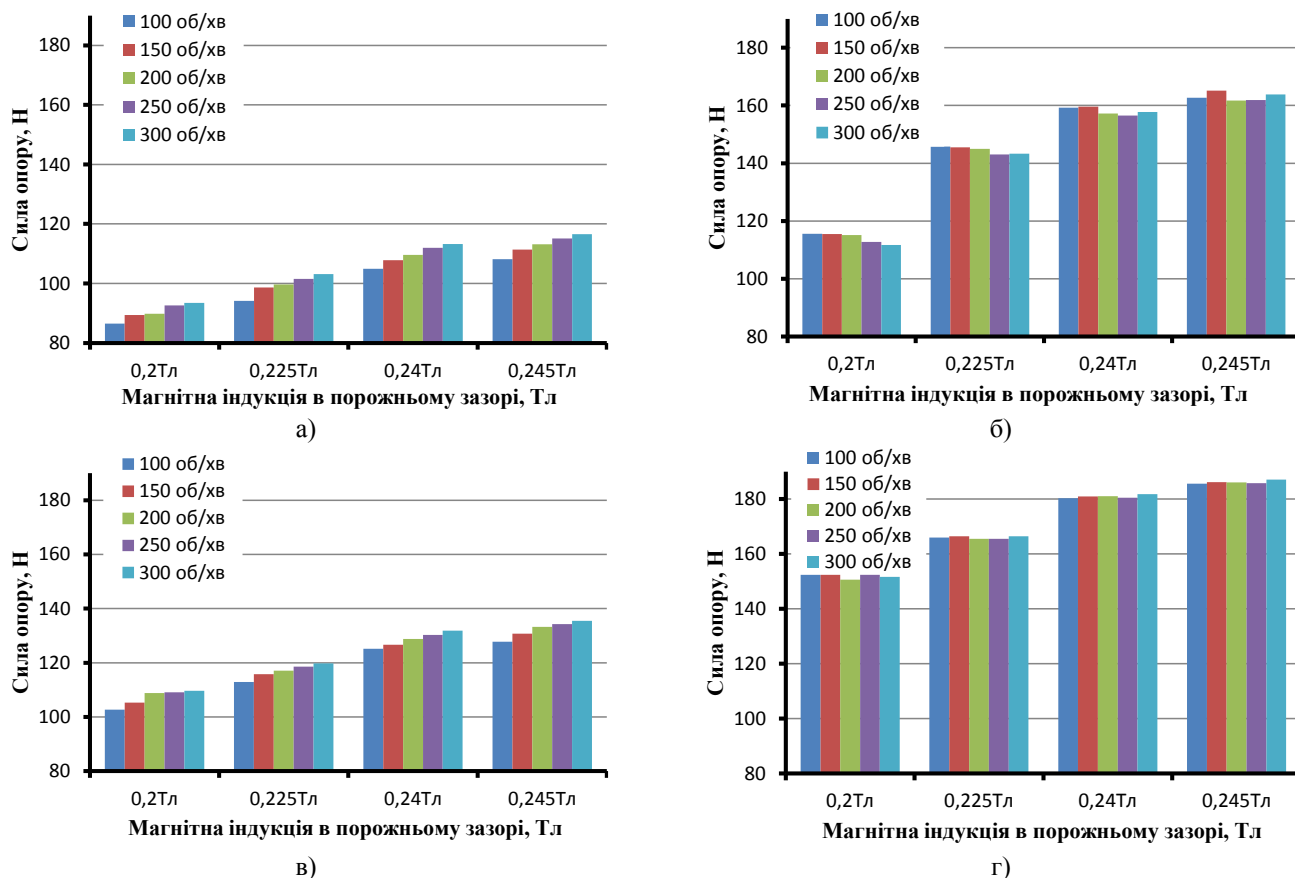


Рис. 1 – Зміна сил опору з боку MAI рухаючимися немагнітним зразкам, які виготовлені з Д16Т, ВТ 8, БрОц при MAO порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм – в) та 400/315 мкм – г)

При MAO феромагнітних зразків, виготовлених зі сталі 40Х13, незважаючи на більші значення сил опору, ніж при MAO немагнітних зразків, зазначені вище закономірності зберігаються при зміні магнітної індукції в зонах оброблення, тоді як зміна швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни практично не впливає на сили опору, спричинені MAI оброблюваним деталям. Характер зміни усереднених сил опору при MAO феромагнітних зразків представлено на рис. 2. Так при магнітній індукції в робочих зазорах 0,2 Тл сила опору становить 131 – 133 Н, а при 0,245 Тл відповідно 154 – 156 Н. Збільшення сил опору при MAO феромагнітної деталі закономірно, так як магнітна складова сил взаємодії більша і зразку, що рухається, складніше розривати квазістабільні утворення у вигляді веретеноподібних ущільнень, що формуються в процесі MAO перед деталлю. Крім того частина порошку, що знаходиться на кінцях віялоподібних формувань [15] активно взаємодіє з конусоподібними стовпчиками, які розташовуються на поверхні полюсів робочої камери, збільшують їх щільність, внаслідок чого підвищується ймовірність формування зон заклинювання в MAI між поверхнею деталі та полюсними наконечниками.

Цьому сприяє і магнітне поле, оскільки феромагнітна деталь є концентратором магнітного поля і призводить до істотної зміни його градієнта в об'ємі магнітного зазору. Має місце ріст магнітної індукції в зазорі між поверхнею деталі та полюсом, що створює передумови для зміщення окремих об'ємів порошку із середньої частини зазору до полюсних наконечників – в області з підвищеною магнітною індукцією та додаткового ущільнення MAI.

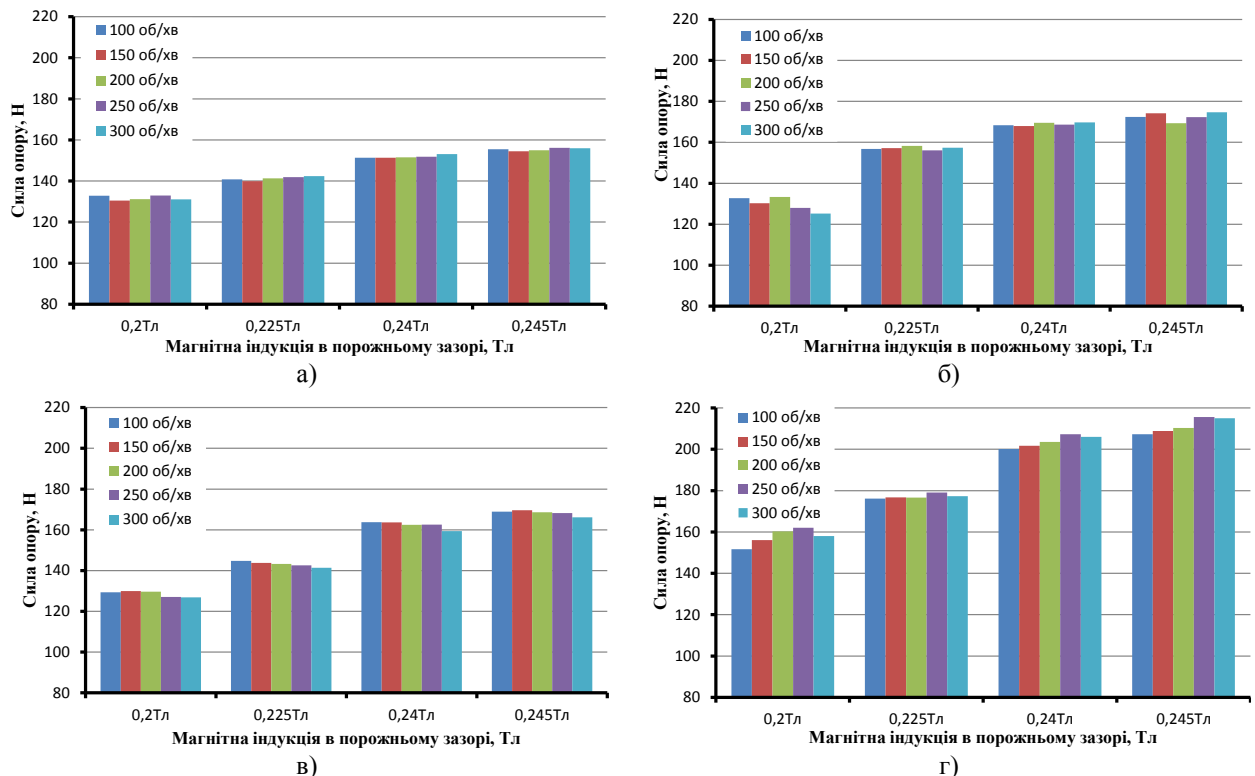


Рис. 2 – Зміна сил опору з боку МАІ рухаючимс я феромагнітним зразкам, які виготовлені зі сталі 40Х13 при МАО порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм та 400/315 мкм – г)

Підтвердженням зазначеного факту є топограми зміни величини магнітної індукції в робочих зазорах, заповнених порошком з оброблюваною феромагнітною деталлю і без неї (рис. 3). Формування зон заклинювання сприяє зростанню сил опору, що може бути пов'язане з псевдозбільшенням поперечного перерізу деталі частинками порошку, що знаходяться в малорухливому стані на поверхні феромагнітних деталей.

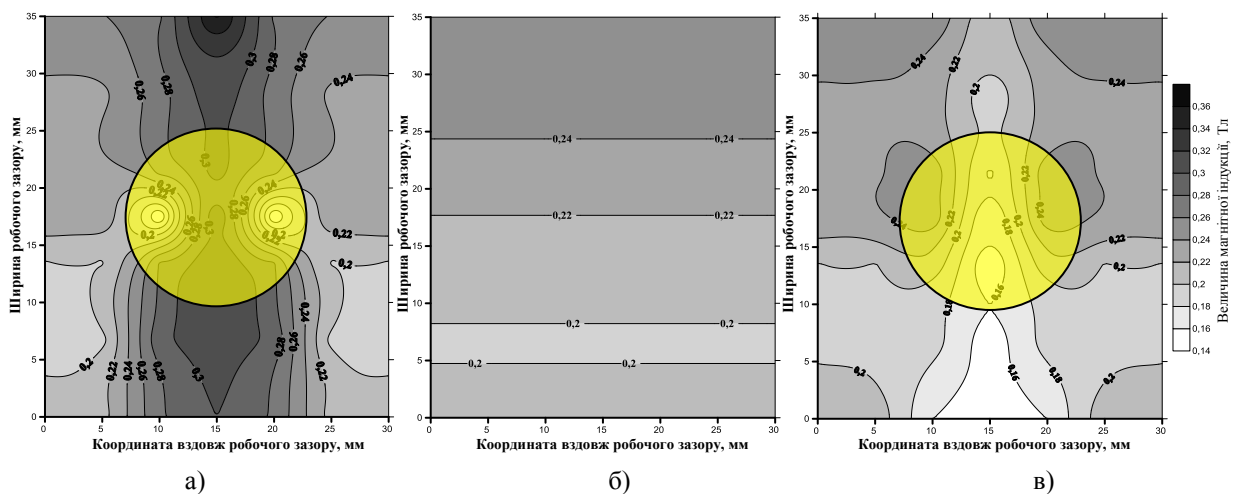


Рис. 3 – Характер зміни магнітного поля в робочих зонах кільцевої ванни заповнених порошком Феромап з феромагнітною деталлю – а), без обробленої деталі – б), в) – з діамагнітною деталлю

Аналіз отриманих топограм зміни величини магнітної індукції в робочих зазорах поблизу оброблюваних деталей, виготовлених з магнітних і немагнітних матеріалів дозволив встановити, що при обробленні феромагнітних деталей в зазорі між поверхнею зразка та поверхнею полюсного наконечника має місце збільшення не менше ніж на 40% магнітної індукції, а для діамагнітних деталей – понад 30% зниження. Подібний перерозподіл магнітного поля сприятиме перерозподілу магнітно-абразивного порошку в зонах оброблення, який при МАО феромагнітних деталей зміщуватиметься в області з підвищеною магнітною індукцією, формуючи в них зони заклинювання і, відповідно, при МАО немагнітних деталей прагнути переміститися з областей з пониженою, у напрямку до областей з вищою магнітною індукцією. Найявність подібного ефекту, який має місце в області між полюсом і поверхнею деталі, так званої пригратиної області, де можливе формування так званої "мертвої зони" [7, 10, 15], де магнітно-абразивний порошок мало рухомий вимагає додаткового дослідження.

Подальші дослідження виконували при MAO феромагнітної сталі 40X13 та парамагнітного сплаву титану BT 8.

Встановлено періодичну зміну сил опору MAI оброблюваній деталі поблизу їхнього середнього значення. Характерні залежності зміни сил опору при MAO як магнітних, так і немагнітних зразків представлені на прикладі оброблення феромагнітної сталі 40X13 порошком Полімам-М на рис. 4.

Подібні залежності зміни сил опору MAI при MAO характерні як для магнітних, так і немагнітних зразків. Слід зазначити, що при підвищених швидкостях MAO більше 2 – 2,5 м/с мають місце нестійкості, пов'язані з періодичним зменшенням величини амплітуд коливань сил опору.

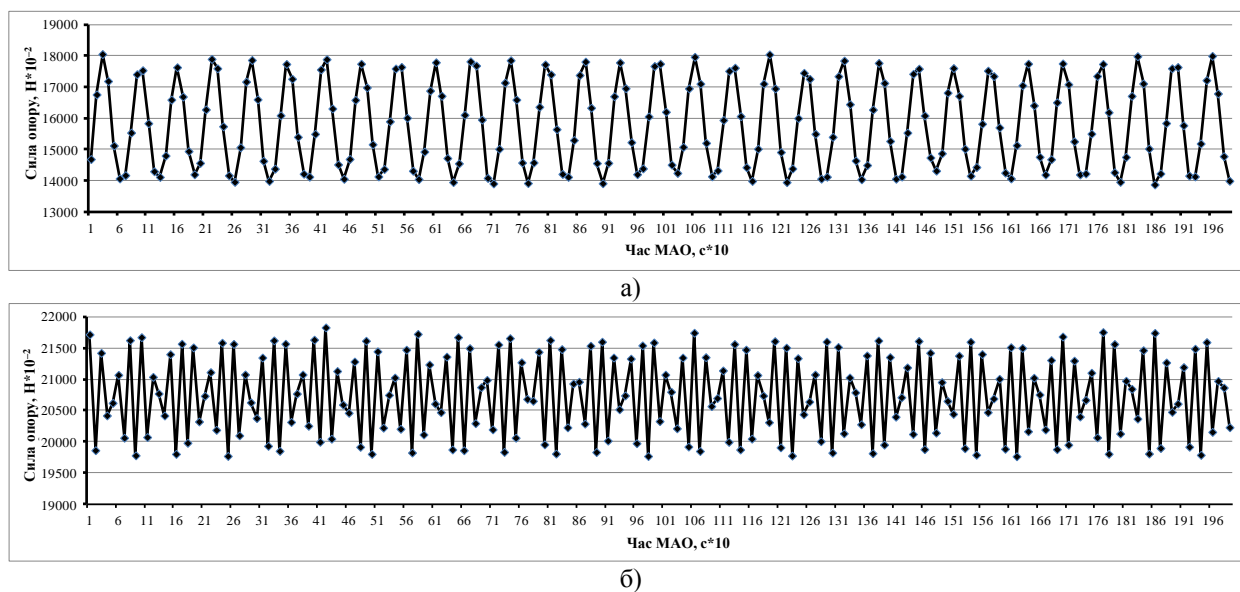


Рис. 4 – Зміна сили опору в залежності від часу MAO зразка з феромагнітної сталі 40X13 при обробленні порошком Полімам-М при швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни 1 м/с та магнітній індукції в порожньому зазорі 0,2 Тл – (а) та швидкості обертання 3 м/с та магнітній індукції 0,245 Тл – (б)

Подібна поведінка MAI при підвищених швидкостях MAO може бути пов'язана з особливостями перебудови, зміною розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умовами їх взаємодії з оброблюваними поверхнями або з наявністю модуляції сигналу, що надходить з датчика і залежить від частоти, з якою здійснюється запис даних. Даний ефект вимагає додаткового, більш ретельного аналізу з метою отримання реальних, більш точних значень.

Було виконано аналіз характеру зміни в циклі оброблення середніх величин амплітудних значень сил опору, що спричиняються MAI при MAO магнітних та немагнітних деталей різними порошками. Зміни амплітудних значень коливань сил опору поблизу їхнього середнього значення, як правило, підпорядковуються загальним закономірностям для різних матеріалів та різних умов MAO. Встановлено, що найбільша амплітуда коливань сил лобового опору руху деталей має місце при малих швидкостях оброблення як пара-, так і феромагнітних зразків при використанні порошків з розміром частинок 400/315 мкм і коливається в діапазоні 45 – 70 Н. У міру збільшення швидкості MAO, як і зменшення розміру частинок MAI зазначені коливання зменшуються в 2 – 2,5 рази до 15 – 20 Н. Така поведінка порошку пояснюється перебудовами структурних елементів MAI, їх руйнуванням, зміною їх розмірів, формуванням ущільнених об'ємів з порошку в зазорі між полюсним наконечником і поверхнею деталі, розривом віялоподібних ущільнень, коливанням груп конусоподібних стовпчиків, які відбуваються при русі деталей в порошковому магнітно-абразивному інструменті. При цьому відбувається зміна реологічних характеристик MAI, здатність окремих частинок провертатися як відносно оброблюваної поверхні, так і відносно суміжних частинок, які формують представницькі об'єми [1].

**Висновки.** Виконані систематичні дослідження з безпосереднього вимірювання сил лобового опору, що спричиняється магнітно-абразивним інструментом оброблюваним циліндричним деталям діаметром 16 мм і висотою 30 мм, виготовлених з пара-, феро- та діамагнітних матеріалів, в кільцевій камері діаметром 200 мм з робочою висотою 30 мм при швидкостях оброблення в діапазоні 1 – 3 м/с, магнітній індукції в робочих зонах, що змінюється в діапазоні 0,2 – 0,25 Тл. Показано, що сили опору суттєво залежать від магнітних та реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту. При MAO лобовий опір для немагнітних деталей практично однаковий і не залежить від швидкості оброблення, а зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах має місце його лінійне зростання. Коефіцієнт збільшення лобового опору, що визначається магнітним полем, для порошків розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, що сили лобового опору при MAO феромагнітних зразків як і для немагнітних зразків не залежать від швидкості оброблення і змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н, це в 1,2-1,45 разів вище, ніж для немагнітних деталей, що пов'язано з дією сил магнітного походження та особливостями взаємодії структурних елементів MAI з оброблюваними поверхнями, формуванням зон заклинювання між поверхнею деталі та полюсними наконечниками кільцевої ванни. Встановлено періодичну зміну сил опору MAI оброблюваній деталі поблизу їх середнього значення, пов'язані з особливостями перебудови, зміною

розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умовами їх взаємодії з оброблюваними поверхнями.

#### Список літератури:

1. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.
2. Майборода В. С. Магнітно-абразивная обработка специальных деталей. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.
3. Джулій Д. Ю. Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Джулій Дмитро Юрійович. – Київ, 2014. – 175 с.
4. Майборода В. С. Магнітно-абразивна обробка осового і кінцевого різального інструменту. 5. Дослідження впливу умов базування деталей на зміну геометричних характеристик різальних кромок свердел при магнітно-абразивній обробці / В.С. Майборода, Д. В. Хроновский, В. І. Солодкий, Н. В. Ульяненко / Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2002. – №5. – С.69–73.
5. Гейчук В. М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Гейчук Володимир Миколайович. – Київ, 2012. – 472 с.
6. Тарган Д.В. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / Д. В. Тарган, В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві. – Кременчук: КрНУ, 2017. – №106. – С. 82-88.
7. Майборода В. С. Структурно-фізическая модель формирования магнитно-абразивного инструмента в больших магнитных зазорах кольцевого типа при обработке стержневых изделий / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, І. В.Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Випуск 1(10). – С. 36–46.
8. Гавриш А. П. Перетворювач для вимірювання тиску порошку на оброблювану поверхню при магнітно-абразивній обробці / А. П. Гавриш, О. О. Мельник // Технологія і техніка друкарства. – Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ, 2008. – №1(19). – С. 101–105.
9. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
10. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зонах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна. – Київ, 2015. – 164 с.
11. Майборода В. С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого з двофракційних сумішей порошків при магнітно-абразивній обробці у великих магнітних щілинах // Технологічні системи. – 2007. – №1(37). – С.40–55.
12. Степанов О. В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.
13. Майборода В. С. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / В. С. Майборода, К. О. Заставський, Р. Б. Жук // Житомир: Технічна інженерія. – 2021. – №2(88). – С.3–13.
14. Оликер В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М.:Металлургия, 1990. – 176 с.
15. Майборода В. С., Слободянюк І. В., Джулій Д. Ю. Магнітно-абразивная обработка деталей сложной формы. Житомир: ПП "Рута", 2017. 272 с.

#### References (transliterated)

1. Maiboroda V. S. *Osnovi stvorenniya i vikoristannya poroshkovogo magnitno-abrazivnogo instrumentu dlya finishnoyi obrobki fasonnikh poverkhon* [Fundamentals of creating and using of the powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces]: dis. doc. tech. sciences. – Kyiv. 404 p (2001).
2. Maiboroda V. S. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka spetsialnykh detalej* [Magneto-abrasive machining of special parts]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 170 p (1988).
3. Dzhulii D. Yu. *Pidvishhennya yakosti bagatogrannikh neperetochuvanikh tverdosplavnikh plastin pri magnitno-abrazivnomu obroblenni v kilczevij vannii* [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 175 p (2014).
4. Maiboroda V. S., Khronovskij D. V., Solodkij V. I., Ulyanenko N.V. *Magnitno-abrazivna obrobka osovogo i kinczevogo rizalnogo instrumentu. 5. Doslidzhennya vplivu umov bazuwannya detalej na zminu geometrichnikh kharakteristik rizalnikh kromok sverdel pri magnitno-abrazivnij obrobctzi* [Magneto-abrasive machining of axial and end cutting tools. 5. Research of influence of conditions of basing of parts on change of geometrical characteristics of cutting edges of drills at magneto-abrasive machining] / *Naukovi visti NTUU "KPI"* [Scientific news of NTUU "KPI"]. Kyiv. №5. 69–73 (2022).
5. Gejchuk V. M. *Sintez kinematiki procesu magnitno-abrazivnoyi obrobki v kilczevij vannii* [Synthesis of kinematics of the process of magneto-abrasive machining in the ring bath]: dis. doc. tech. sciences. – Kyiv. 472 p (2012).
6. Targan D. V., Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu. *Analiz intensivnosti magnitno-abrazivnogo obroblennya mitchikiv v zalezhnosti vid kinematichnikh parametriv procesu* [Analysis of the intensity of magnetic-abrasive treatment of taps depending on the kinematic parameters of the process] / *Visnik KrNU imeni Mikhajla Ostrogradskogo. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni, transporti ta gimnicztvi* [Bulletin of the Mykhailo Ostrohradsky KrNU. Modern technologies in mechanical engineering, transport and mining]. Kremenchuk: KrNU. №106. 82-88 (2017).
7. Maiboroda V. S., Dzhulii D Yu., Tkachuk I. V. *Strukturno-fizicheskaya model formirovaniya magnitno-abrazivnogo instrumenta v bolshikh magnitnykh zazorakh kolczevogo tipa pri obrabotke sterzhnevyykh izdelij* [Structural and physical model of formation of magneto-abrasive tool in large magnetic gaps of ring type during machining of axial parts] / *Naukovi praczi Doneczkogo naczional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Mechanical Engineering and Mechanical Science]. Donetsk: DonNTU. Issue 1 (10). 36–46 (2013).
8. Gavriash A. P., Melnik O.O. *Peretvoryuvach dlya vimiryuvannya tisku poroshku na obroblyuvanu poverkhnyu pri magnitno-abrazivnij obrobctzi* [Converter for measuring the pressure of powder on the machined surface during magneto-abrasive machining] / *Tekhnologiya i tekhnika drakarstva* [Technology and technique of printing]. Kyiv: NTUU "KPI" VPI. №1 (19). 101–105 (2008).
9. Sakulevich F. Yu. *Osnovy magnitno-abrazivnoj obrabotki* [Fundamentals of magneto-abrasive machining]. – Minsk: Science and technology. 328 p (1981).
10. Tkachuk I. V. *Formuvannya magnitno-abrazivnogo instrumentu zi stabilnimi vlastivostyami v robochikh zonakh kilczevogo tipu* [Formation of the magneto-abrasive tool with stable properties in working zones of ring type]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 164 p (2015).
11. Maiboroda V. S. *Doslidzhennya vlastivostej magnitno-abrazivnogo instrumentu, sformovanogo z dvokhfrazkczijnikh sumishej poroshkiv pri magnitno-*

- abrazivnij obrobcezi u velikikh magnitnikh shhilinakh* [Investigation of properties of magneto-abrasive tool formed from two-fractional mixtures of powders during magneto-abrasive machining in large magnetic gaps] / *Tekhnologichni sistemi* [Technological systems]. №1 (37). 40–55 (2007).
12. Stepanov O. V. *Issledovanie processa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlya obrabotki detalej slozhnoy geometricheskoy formy* [Investigation of the process of formation of a magneto-abrasive powder tool for machining parts with complex geometric shapes]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 145 p (1997).
  13. Maiboroda V. S., Zastavskiy K. O., Zhuk R. B. *Osoblivosti vzayemodiyi magnitno-abrazivnogo instrumentu z obroblyuvanoyu poverkhneyu v umovakh kilczevoyi vanni* [Features of interaction of the magneto-abrasive tool with the machined surface in the conditions of a ring bath] / *Zhytomyr: Technical engineering*. №. 2 (88). 3–13 (2021).
  14. Olikar V. E. *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostojkikh pokritij* [Powders for magneto-abrasive machining and wear-resistant coatings]. – Moskva, Metallurgy. 176 p (1990).
  15. Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalej slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts of complex shape]: monografiya. – Zhytomyr: PP "Ruta". 272 p (2017).

Поступила (received) 24.03.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovich)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com).

**Джулії Дмитро Юрійович (Dzhulii Dmytro Yuriyovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: [dmytro.dzhulii@gmail.com](mailto:dmytro.dzhulii@gmail.com).

**Бесарабець Юрій Йосипович (Besarabets Yuriy Josipovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>; e-mail: [york\\_bessar@ukr.net](mailto:york_bessar@ukr.net).

**Слободянюк Іванна Валентинівна (Slobodianiuk Ivanna Valentynivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2691>; e-mail: [ivannavalentinovna@gmail.com](mailto:ivannavalentinovna@gmail.com).

**Заставський Костянтин Олегович (Zastavskiy Konstantyn Olegovich)** – аспірант кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; e-mail: [zastavskiy96@gmail.com](mailto:zastavskiy96@gmail.com).



*КЛОЧКО О. О., КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА К. В., ОХРИМЕНКО О. А., МАНОХІН М. С., ПЕРМЯКОВ Є. О.*

## **ВПЛИВ МАСТИЛА НА ТЕХНІЧНИЙ РІВЕНЬ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПЕРЕДАЧ З СИМЕТРИЧНИМ ПРОФІЛЕМ**

**Анотація.** Розглянуті питання підвищення ефективності при гідродинамічному (рідинному) або граничному (напіврідинному) режимах тертя зубчастих передач з асиметричним профілем та вплив рідини на ушкоджувальність зубів, втрати потужності та температури в контакті, а також виконує роль пружного середовища, що демпфує удари і змінює контактні лінії. У багатьох зубчастих передачах зубне навантаження на один зуб є значно вищим і застосовується для більш тривалих періодів часу. Асиметрична форма зуба відбиває цю функціональну різницю. У разі асиметричних передач стандартна симетрична зубчаста інструментальна рейка змінюється шляхом зміни кута тиску однієї з бічних поверхонь. Однак такий спрощений підхід до конструкції асиметричної передачі суттєво обмежує можливість максимізувати продуктивність широкого спектра можливих застосувань цих передач. У міру збільшення частоти ударних взаємодій мастильний шар високошвидкісних зубчастих передач з асиметричним профілем перестає реагувати на зміну тиску, а величина навантаження, що визначає найменшу в часі товщину шару, наближається до мінімальної стаціонарної складової спектра динамічних навантажень. Одночасно дещо зменшуються рівні шуму та вібрацій. Отже, у розрахунках на міцність на контактну витривалість і на заїдання високошвидкісних зубчастих передачах з асиметричним профілем комплексний вплив критеріальних параметрів мастила необхідно враховувати не тільки при визначенні допустимих напруг, але і при встановленні величини динамічного посилення навантаження через ударну взаємодію зубів.

**Ключові слова:** зубчасті передачі, асиметричний профіль, потужності, мастильний шар, навантаження, товщина шару, рівні шуму та вібрацій, комплексний вплив критеріальних параметрів.

### **KLOCHKO O. O., KAMCHATNA-STEPANOVA K. V., OHRIMENKO O. A., MANOKHIN A. S., ERMAYKOV E. O. INFLUENCE OF LUBRICANT ON THE TECHNICAL LEVEL OF HIGH-SPEED GEARBOXES WITH ASYMMETRICAL PROFILE**

**Annotation.** The issues of efficiency improvement in hydrodynamic (liquid) or limit (semi-liquid) modes of friction of gears with an asymmetric profile and the effect of the liquid on tooth damage, power loss and temperature in contact, as well as the role of an elastic medium that dampens shocks and changes contact lines, are considered. In many gears, the tooth load per tooth is much higher and applied for longer periods of time. The asymmetrical shape of the tooth reflects this functional difference. In the case of asymmetric gears, the standard symmetrical toothed tool rail is modified by changing the pressure angle of one of the side surfaces. However, this simplistic approach to the design of an asymmetric transmission significantly limits the ability to maximize the performance of a wide range of possible applications of these transmissions. As the frequency of impact interactions increases, the lubricating layer of high-speed gears with an asymmetric profile ceases to respond to pressure changes, and the load value, which determines the smallest layer thickness over time, approaches the minimum stationary component of the spectrum of dynamic loads. At the same time, noise and vibration levels are slightly reduced. Therefore, in the calculations of the strength, contact endurance and seizure of high-speed gears with an asymmetric profile, the complex influence of the criterion parameters of the lubricant must be taken into account not only when determining the allowable stresses, but also when determining the amount of dynamic load amplification due to the impact interaction of the teeth.

**Keywords:** gears, asymmetric profile, power, lubricating layer, load, layer thickness, noise and vibration levels, complex influence of criterion parameters.

**Вступ.** Багатокритеріальна та об'єктивна оцінка технічного рівня сучасних конструкцій передач з асиметричним профілем [1,2,3] досягається лише при використанні необхідної та достатньої системи фізично-інформативних показників якості, що формується кібернетичними методами [4]. Для вирішення завдань локальної оптимізації основних компонентів конструкції в якості критеріальних, можуть використовуватися як комплексні, так і поодинокі показники якості, що відповідають вимогам незалежності за перевагою для споживача, достатньої інформативності та чутливості, тимчасової спроможності та керованості. В умовах безперервного підвищення рівня потужностей, що передаються, і стабілізації показника питомої маси для приводів машин вирішення проблеми оптимального підбору мастильних матеріалів за основними критеріями працездатності зубчастих і черв'ячних передач є одним з найбільш ефективних напрямів їх подальшого технічного вдосконалення [5].

**Мета дослідження.** Дослідити запропоновану ідею з метою вирішення завдання підвищення ефективності при гідродинамічному (рідинному) або граничному (напіврідинному) режимах тертя зубчастих передач з асиметричним профілем та вплив рідини на ушкоджувальність зубів, втрати потужності і температуру в контакті, але і виконує роль пружного середовища, що демпфує удари і змінює розподіл навантажень по довжині контактних ліній. Так, для закритих евольвентних передач з поверхнево-зміцненими хіміко-термічною обробкою зубами найбільш актуальним є запобігання глибоким (підшаровим) ушкодженням, зумовленим концентрацією навантаження в зачепленні, критеріальним показником якого є добуток коефіцієнтів  $K_a \cdot K_\beta$  [6].

**Викладення основного матеріалу.** При проектуванні передач з об'ємно-загартованими зубами, призначених для експлуатації при малих та середніх окружних швидкостях ( $V_{окр} \leq 25$  м/с), технічний рівень конструкцій обмежений граничними навантаженнями з згинальної витривалості або заїдання WF, WS. Досягнення оптимальних значень WF і WS забезпечується певним поєднанням параметрів точності та геометрії зачеплення (модифікацією робочих поверхонь зубів для досягнення рівномірного розподілу навантаження), удосконаленням механічних властивостей матеріалів та технологій фінішної обробки зубів емпіричним підбором мастил та присадок, максимально адаптованих до умов експлуатації передачі.

При проектуванні таких зубчастих передач вплив мастильного шару в зачепленні не враховується. Низькотемпературне заїдання (атермічне схоплювання) виникає значно рідше, ніж високотемпературне, і спостерігається, в основному, в тихохідних, важко навантажених передачах, якщо гідродинамічний ефект недостатній для утворення шару мастила, що несе. Внаслідок низької температури, хімічні процеси утворення твердих захисних плівок на поверхнях тертя сповільнюються або відсутні. У таких умовах основою захисту зубів є застосування високов'язких малоочищених залишкових мастил із підвищеною концентрацією поверхнево-активних речовин.

У багатьох зубчастих передачах зубне навантаження на один зуб є значно вищим і застосовується для більш тривалих періодів часу. Асиметрична форма зуба відбиває цю функціональну різницю.

Є публікації про зубчасті передачі з асиметричними зубами [1, 2, 3], де геометрія зуба визначається попередньо обраними параметрами зубчастої рейки асиметричного генератора. Подібний підхід зазвичай використовується в традиційній конструкції шестерень звичайних шестерень із симетричними зубами. У разі асиметричних передач стандартна симетрична зубчаста інструментальна рейка змінюється шляхом зміни кута тиску однієї з бічних поверхонь. Однак такий спрощений підхід до конструкції асиметричної передачі суттєво обмежує можливість максимізувати продуктивність широкого спектра можливих застосувань цих передач.

Альтернативний метод Direct Gear Design is не обмежений попередньо обраними основними параметрами стійки та забезпечує асиметричну геометрію зубів шестерні, оптимізовану для конкретних додатків із зубчастою передачею [3, 4]. Коефіцієнт асиметрії зубчастої передачі  $K$  дорівнює:

$$K = \frac{\cos \alpha_{wc}}{\cos \alpha_{wd}}, \quad (1)$$

де:  $\cos \alpha_{wc}$  – кут вихідного профілю,  $\cos \alpha_{wd}$  – кут асиметрії.

Існують різні приклади конструкцій передач з асиметричним профілем, де зубчаста пара передає навантаження в обох напрямках, але зі значною величиною і тривалістю (рис.1). В цьому випадку коефіцієнт асиметрії зубчастої передачі  $K$  може бути визначений вирівнюванням потенціалу накопичення поверхневого пошкодження зуба, яке залежить від робочої контактної напруги та числа циклів навантаження на бічні поверхні зубів з урахуванням молекулярно-механічного зношування.

У високошвидкісних зубчастих передачах з асиметричним профілем [1, 2, 3] ( $V_{окр} > 25$  м/с) можливість виникнення процесу заїдання, як основної форми молекулярно-механічного зношування, визначається співвідношенням часу, необхідного для ефективної хімічної взаємодії мастила з мікроділянками чистого металу, та середнього часу контактування робочих поверхонь зубів. Оскільки в процесі експлуатації машин і механізмів вміст води в мастилі може досягати 1%, робоче середовище є одночасно поверхнево-активним і корозійно-агресивним, що призводить до зниження контактної та згинальної витривалості зубів у зв'язку з електрохімічним впливом на поверхні, що утворюються при розвитку втомних тріщин.

У лабораторних умовах встановлено, що інтенсивність заїдання збільшується зі зростанням контактної напруги (або тиску  $P_0$ ), швидкості ковзання  $V_C$  і температури  $T$  в зоні контакту. Однак до цього часу відсутній загальноприйнятий критерій, що однозначно характеризує можливість виникнення заїдання при різних режимах тертя та умовах змащування високошвидкісних зубчастих передач з асиметричним профілем.

В основу сучасних методів розрахунку покладено такі наукові гіпотези:

- інтенсивне заїдання найімовірніше, якщо відношення товщини шару мастила  $h_0$  до середньоквадратичного відхилення висоти мікронерівностей менше деякого граничного значення [4];
- задир відбувається у разі, якщо миттєва температура в зоні контакту перевищує деяке критичне значення  $T_{CR}$  для певного поєднання матеріалів поверхонь, що труться, і сорту мастила [5];
- заїдання настає, якщо інтенсивність потужності сил тертя в контакті  $fP_0V_C$  перевищує певну величину [6].

Отже, основні фізико-механічні та хімічні характеристики масляної плівки в умовах навантаженого контакту елементів зачеплення, а саме мінімальна товщина  $h_0$ , критична температура  $T_{CR}$  та коефіцієнт тертя  $f$  є найважливішими комплексними критеріальними показниками, що визначають початок та протікання процесу заїдання високошвидкісних зубчастих передач з асиметричними.

Внутрішні динамічні навантаження в зубчастому зачепленні високошвидкісних зубчастих передачах з асиметричним профілем [1, 3], незважаючи на застосовувані конструктивні та технологічні заходи щодо їх зниження, залишаються потужним джерелом вібрації та підвищеної акустичної емісії, що істотно знижує конкурентоспроможність відповідних середньо- та високошвидкісних передач у порівнянні з іншими сучасними конструкціями приводу, зокрема, електричним, гідравлічним, пневматичним.

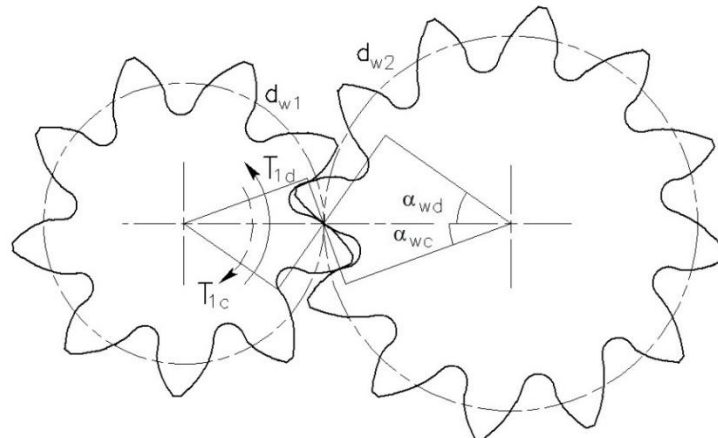


Рис. 1 – Асиметричні зубчасті передачі

Це зумовлено інтенсивною динамічною взаємодією профілів зубів у процесі пересполучення, що має стохастичний або детермінований характер (залежить від геометрії зачеплення, конструкції зубчастих коліс, точності виготовлення). Наприклад, у передачах із зачепленням Новікова товщина мастильного шару приблизно вдвічі більша, ніж у евольвентних передачах, що забезпечує більшу плавність роботи. Одночасно відбувається більш інтенсивне пересування обсягів мастила до торців зубчастих коліс - "бомбардування" стінок корпусу і, в результаті підвищення рівня акустичної емісії редукторів з зачепленням Новікова.

В експлуатаційних умовах робочі поверхні зубів для високошвидкісних зубчастих передач з асиметричним профілем будь-якої точності виготовлення крім швидкості руху, спрямованої по дотичній до майданчиків контакту, мають також швидкість, спрямовану за нормаллю (періодично зближуються або видаляються один від одного). При цьому характер динамічних явищ у зачепленні залежить від співвідношення між періодом коливань  $\Pi$  і часом реалізації різних фаз зачеплення.

Як правило, для тихохідних та середньошвидкісних передач загасання власних коливань коліс відбувається за час кожної з послідовних фаз зачеплення зубів, а для швидкохідних – період  $\Pi$  може перевищувати час кількох пересполучень. Як наслідок, підвищується ймовірність виникнення та інтенсивність перебігу резонансних явищ. Практика експлуатації показує, що більш в'язкі мастила краще демпфують динамічні навантаження в зачепленні і знижують шумність передач, одночасно мастило з меншою в'язкістю інтенсивніше відводить теплоту від зубчастих коліс, краще розбризкується і змачує ефективніше підшипники кочення, легше прокачується через фільтри і холодильники.

При призначенні певної рідкої мастила беруть до уваги, перш за все, її динамічну  $\mu$  або кінематичну  $\nu$  в'язкість. Зі збільшенням в'язкості покращуються умови створення гідродинамічної масляної плівки, що розділяє поверхні, що змачуються і запобігає їх безпосередній металевий контакт, зменшується ймовірність пошкодження робочих поверхонь.

На коефіцієнт тертя  $f$  в'язкість мастила впливає аналогічний впливу швидкості ковзання: при великих значеннях  $\mu$ ,  $\nu$  підвищується несуча здатність мастильного шару і одночасно збільшуються сили опору в'язкому зсуву. Через війну коефіцієнт тертя  $f$  зменшується незначно. Одна з найпоширеніших рекомендацій щодо вибору в'язкості мастила для змачування тяжко навантажених зубчастих високошвидкісних зубчастих передач з асиметричним профілем:

$$V_{50} = (100 \dots 200) / V_{\text{окр}}^{0,4}. \quad (2)$$

Величина критичної температури  $T_{\text{CR}}$  відповідає температурі втрати орієнтації адсорбованих на поверхні металу молекул мастила і, відповідно до гіпотези Г. Блоку, залишається постійною незалежно від режиму та умов тертя. Значення  $T_{\text{CR}}$  визначаються експериментально у лабораторних умовах на машинах тертя. Наприклад, для добре очищених мінеральних мастил встановлено діапазон значень  $T_{\text{CR}} = 115 \dots 180$  °C [6].  $T_n \cong 0,8 T_{\text{CB}}$  [6].

При зменшенні шорсткості робочої поверхні сталевого ролика від величини  $R_z = 0,63$  мкм до значень (0,25...0,3) мкм при змачуванні мастилом МТ-16П досягнуто зниження середньої температури зразків на 15...20°C, а граничне навантаження по заїданню збільшилося на 12...20%. Аналогічний, але більш значний ефект, зафіксований при застосуванні мастила Mobilgear 632, що відрізняється наявністю гідролітично стабільних протизносних та антифрикційних присадок, а також жирних кислот рослинного походження.

Протизадірні присадки утворюють на поверхнях тертя тверді плівки з високими мастильними властивостями, що дозволяє уникнути заїдання навіть при високих температурах в контакт. Одночасно відзначено підвищення інтенсивності електрохімічного зношування на поверхнях тертя, що може негативно вплинути на довговічність елементів зачеплення та підшипникових вузлів.

Об'єм мастильної ванни в корпусі редуктора повинен бути достатнім, щоб уповільнити старіння масла, створити умови для відстою продуктів зношування і, найголовніше, забезпечити оптимальні умови для тертя при тепловому режимі роботи передач. В умовах, коли об'ємна температура мастила не перевищує гранично допустиме значення  $[T]$ , мастило зберігає розрахункову в'язкість і виконує свої функції в межах встановленого терміну служби. Для мінеральних мастил встановлено діапазон значень  $[T] = (80 \dots 95)$  °C, а при використанні спеціальних присадок або синтетичних мастил допускаються підвищені значення  $[T] = (100 \dots 110)$  °C. Залежно від теплової напруженості редуктора обсяг мастила, що заливається, рекомендується в межах 3,5-10 л на 1 кВт втраченої потужності або 0,35-0,7 л на 1 кВт потужності, що передається (менше значення відповідає меншій в'язкості мастила, і навпаки). При обмеженому обсязі картера для встановлення теплового балансу на необхідному рівні в сучасних конструкціях зубчастих та черв'ячних редукторів застосовують розвинене ребра корпусу, інтенсивне обдування вентилятором, водяне охолодження ванни або циркуляційну мастильну систему. Збільшення частоти обертання  $n$  зубчастих коліс одночасно підвищує швидкість кочення та ковзання в контакт. Передбачається, що при стаціонарному навантаженні і пікових тисках в мастильному шарі, що виникають за рахунок гідродинамічних сил, відбувається різке зниження товщини мастильного шару на окремих ділянках поверхонь, що труться.

Зростання швидкості кочення  $V_k$  сприяє зменшенню коефіцієнта тертя та температури зубів, збільшенню товщини мастильної плівки. При цьому температура мастильного шару може дещо збільшуватись. Збільшення швидкості ковзання  $V_c$  зменшує коефіцієнт тертя, проте загальне тепловиділення та температура контакту при цьому збільшуються, товщина масляної плівки зменшується. Отже, загальний вплив швидкості кочення та ковзання протилежний: збільшення швидкості кочення сприяє збільшенню навантаження заїдання, а підвищення швидкості

ковзання викликає її зменшення.

Інтегральний характер кривої  $W_s = f(n)$  у діапазоні окружних швидкостей  $v_{кр} \in [10; 50]$ , м/с, відповідає гіперболічній функції. Зазначені закономірності використані в рекомендаціях ISO/TR 13989 - 1:2000 і відображені в стандарті ФРН на розрахунок навантажувальної здатності циліндричних евольвентних передач коефіцієнтом  $Z_L$ , що інтегрально враховує вплив в'язкості мастила на контактну напругу: [4, 6]

$$Z_L = 0,91 + \frac{0,25}{\left(1 + \frac{112}{v_{40}}\right)^2}. \quad (3)$$

Про необхідність обліку в розрахунках міцності високошвидкісних зубчастих передачах з асиметричним профілем ефекту демпфування мастильним шаром ймовірних або детермінованих ударних взаємодій зубів [5, 6, 7]. Запропоновано дискретно зменшувати середньоквадратичну різницю основних кроків зубів  $D_0$ , що визначає значення коефіцієнта динамічного навантаження в зачепленні: на величину 5 мкм при значеннях  $D_0 > 10$  мкм і величину  $D_0 / 2$  при  $D_0 < 10$  мкм. Ці рекомендації не отримали широкого застосування, оскільки недостатньо повно відображають динамічні явища в зачепленні, зокрема, не враховано ефекту перерозподілу навантаження по довжині контактних ліній внаслідок різної інтегральної жорсткості контакту та зміни товщини масляної плівки в залежності від частоти пересполучення зубів.

Випробувані зубчасті колеса наводяться в обертання через муфту Ольдгейма електродвигуном ПН-45, виконаним у вигляді мотор-ваги (для вимірювання коефіцієнта тертя випробуваної зубчастої пари).

Враховуючи цю обставину, були проведені експерименти щодо дослідження впливу граничного тертя при різних швидкостях тертя та навантаженнях. Дослідження проводили на спеціальній машині тертя (рис. 2) за схемою навантаження пари зубчастих коліс і за допомогою багатофакторного експерименту визначалася залежність впливу хвилястості та макровідхилення на процес тертя.

Технічні дані експериментальної установки такі: діаметр випробуваних зубчастих коліс від 100 до 240 мм; частота обертання валу 400-2100 об/хв; навантаження, що діє на зубчасту пару, до 8000-10 000 кгм.

У комплект вимірювальної апаратури входять: електронний прилад для вимірювання товщини та форми мастильного шару; блок живлення щодо нього; два тарувальних прилади.

Для зубчастих коліс з асиметричним профілем робочою рідиною для поверхонь, що сполучаються, запропонований метод експериментального визначення товщини мастильного шару [8, 9, 12].

Суть методу полягає в тому, що евольвентні поверхні сполучених зубчастих коліс є пластинками конденсатора в якості діелектрика приймається робоча рідина, мастило, яке складається з суміші вуглеводнів і/або гліцеринових ефірів вищих ненасичених карбонових кислот та є непоганим діелектриком, так як молекули, що входять до його складу майже не полярні і не дисоціюють. Осі обертання зубчастих коліс встановлені на ізольованих опорах 3, 4 і підключені до вимірювального приладу ємності 5 (рис. 3)



Рис. 2 – Спеціальна машина тертя СМТ-1С випробування циліндричних зубчастих коліс з асиметричним профілем

Метою виміру пропонованого приладу є безперервність вимірів в період контактування сполучених евольвентних поверхонь.

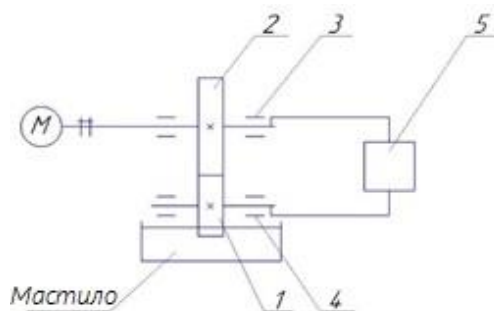


Рис. 3 – Пристрій вимірювального приладу

Пристрій містить провідне зубчасте колесо в якому розташований електрод 1 вимірювального конденсатора, другий електрод 2 розташований в підпорядкованому зубчастому колесі. Щоб уникнути замикання схеми – вали даної передачі встановлені на діелектричні опори 3, 4. Електроди 1, 2 підключені до вимірювального пристрою 5, яке видає результати вимірів ємності [10, 11].

Пристрій працює наступним чином. При обертанні коліс 1, 2 товщина мастильної плівки змінюється в місці їх зачеплення. Характер розподілу мастильної плівки по зубах коліс визначається виміром ємності конденсатора при різних положеннях зачеплення, які заміряються пристроєм 5.

Ємність конденсатора залежить від відстані між евольвентними поверхнями сполучених зубчастих коліс. Товщина мастильної плівки визначається побічно шляхом заміру ємності в зоні контактування.

Отже, для отримання зв'язку між ємністю і товщиною мастильного шару проводимо настройку приладу в залежності від фіксованих значень товщини зазору, яка є товщиною мастильного шару між пластинками, які знаходяться в маслі.

Налаштування приладу здійснюють наступним чином: на вимірювальному стенді заміряють ємність між пластинками, які знаходяться в маслі з настроюваною товщиною між ними, товщина між ними визначається згідно табл.1.

Таблиця 1 – Тарування приладу по ємності конденсатора в залежності від товщини мастильного шару

Товщина мастильного шару $a$ , мм	Ємність конденсатора $C$ , пф	Типи сполучених коліс
0.05	35	C1, C2, C3, C4, C5
0.08	84	
0.1	95	
0.15	140	
0.20	230	
0.25	310	

За допомогою приладу можна проводити виміри товщини мастильної плівки як для звичайних умов (ньютонівський стан робочої рідини) так і для зубчастих передач з неньютонівським станом робочої рідини, тобто коли в зоні контактування робоча рідина переходить в пружно-нестисливий стан робочої рідини, в зоні розташування гідрокишень.

Для непрямого контролю товщини мастильного шару при неньютонівському стані робочої рідини замірювання товщини мастильного шару виконується на стенді рис. 2 зі зміною товщини між пластинами конденсатора від 0 до 1 мм. Налаштування товщини зазору виконуємо за допомогою полімерних діелектричних матеріалів, інтервал вимірювання 0,1. Вимірюючи ємність між пластин, які знаходяться в маслі з певною величиною зазору  $a$ . Шляхом зміни швидкості, навантаження – проводиться непряме замірювання товщини мастильного шару через ємність, рис 4.



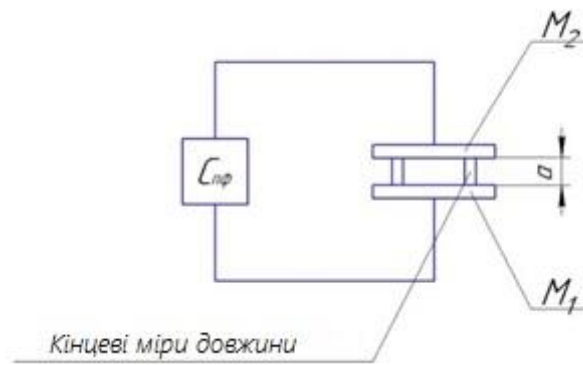


Рисунок 4 – Схема побудови пристрою тестового виміру товщини мастильного шару

Основними параметрами, що характеризують зачеплення циліндричних зубчастих коліс, які працюють при ньютонівському стані робочої рідини, надалі «конденсатори», є їх електрична ємність і кут втрат. Можливі значення їх ємностей лежать приблизно в межах від 1 пФ до 100 пФ.

Допустима похибка вимірювання ємностей «конденсаторів» залежить від сфери їх застосування. Ємність «конденсаторів», що входять до складу коливальних систем, визначаються з похибкою, до 1%.

У кожному «конденсаторі», включеному в електричний ланцюг, мають місце втрати енергії, що виникають головним чином в матеріалі діелектрика, а також внаслідок недосконалості ізоляції між виводами. З урахуванням втрат еквівалентну схему «конденсатора» можна уявити в двох варіантах: або у вигляді ємності  $C$ , включеної послідовно з опором втрат  $R_n$  (рис.5, а), або у вигляді тієї ж ємності  $C$ , що шунтується опором витoku  $R_y$  (рис. 5, б).

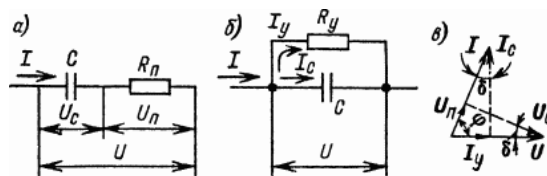


Рисунок 5 – Еквівалентні схеми (а, б) і векторна діаграма (в) ланцюга з конденсатором

При переході від однієї еквівалентної схеми до іншої для перерахунку значення активного опору користуються формулою

$$R_y = 1 / ((2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)^2 \cdot R_n), \quad (4)$$

де  $f$  – частота струму в ланцюзі конденсатора.

З векторної діаграми на рис. 5, в, справедливою для обох варіантів еквівалентних схем, випливає, що в ланцюзі з конденсатором через наявність втрат фазовий зсув  $\varphi$  між струмом  $I$  і напругою  $U$  завжди менше  $90^\circ$ . Втрати в конденсаторі зазвичай характеризують кутом втрат  $\delta = 90^\circ - \varphi$ , визначеним як зазначено на рис. 5 з формули

$$\operatorname{tg} \delta = U_n / U_c = I_y / I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_n = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_y). \quad (5)$$

Втрати в конденсаторі іноді висловлюють коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi$  або струмом витoku  $I_y$ , визначеним при стандартних умовах. Для більшості конденсаторів втрати дуже малі ( $\operatorname{tg} \delta < 0,001$ ), тому можна вважати

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta \approx \sin \delta = \sin (90^\circ - \varphi) = \cos \varphi. \quad (6)$$

Параметри конденсатора ( $C$ ,  $R_n$ ,  $R_y$ ,  $\delta$ ) залежать від зовнішніх умов його роботи – температури, вологості, атмосферного тиску, а також від прикладеної до нього напруги.

Конденсатор, опір витoku якого великий, здатний утримувати тривалий час без помітного зменшення отриманий ним заряд; це дозволяє простими засобами оцінити якість конденсаторів ємністю понад 0,01 мкФ. При підключенні до такого конденсатора омметра стрілка вимірювача останнього за рахунок струму заряду кілька відхилиться, а потім (при великому опорі витoku) повернеться у вихідне або близьке до нього положення. Наступні короточасні підключення до конденсатора омметра, повторювані з інтервалом в декілька секунд, не повинні викликати відхилення стрілки вимірювача. При малому опорі витoku помітне відхилення стрілки буде спостерігатися при кожному підключенні омметра. Для перевірки на витік конденсаторів ємністю понад 100 пФ можна застосувати головні телефони, з'єднані послідовно з низьковольтної батареєю. При малому опорі витoku кожне підключення індикатора до конденсатора викликає клацання в телефонах, тоді як при хорошому конденсаторі клацання прослуховується лише при першому підключенні. Вимірювання значення опору витoku (на постійному струмі) може проводитися індукторним або електронним мегометром [11].

Електролітичні конденсатори слід приєднувати до випробувального приладу з урахуванням полярності включення джерела живлення. Під час вимірювання опору витoku таких конденсаторів рекомендується відлік здійснювати через 10 хвилин після їх включення під напругу, коли процес заряду можна вважати завершеним.

Для вимірювання параметрів конденсаторів застосовуються методи вольтметра–амперметра, безпосереднього вимірювання за допомогою мікрофарадметрів, порівняння (заміщення), бруківки і резонансний.

Напруга, прикладена до «конденсатору» при будь-якому його випробуванні, не повинна перевищувати допустимої робочої напруги. Якщо в процесі випробування конденсатор заряджається до значного напруження, необхідно здійснювати його розряд після закінчення випробування (наприклад, за допомогою кнопки, включеної паралельно конденсатору). Вимірювання ємностей здійснювалося методом вольтметра–амперметра. Живлення вимірювальної схеми здійснюється від джерела струму низької частоти:  $F = 50...1000$  Гц. Схема вимірювань представлена в двох варіантах на рис. 6. Конденсатор, що перевіряється,  $C_x$  включається в ланцюг змінного струму відомої частоти  $F$ , і реостатом (або потенціометром)  $R$  встановлюють необхідне за умовами випробування або зручне для відліку значення струму  $I$  або напруги  $U$ .

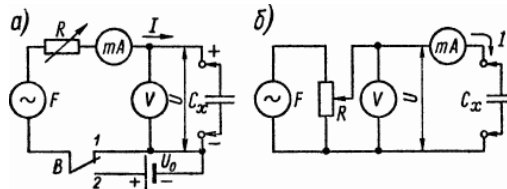


Рисунок 6 – Схеми вимірювання ємностей методом вольтметра–амперметра

За показниками приладів змінного струму  $V$  і  $mA$  розраховували повний опір «конденсатора»

$$Z = (R^2 + X^2)^{0.5} = U/I, \quad (7)$$

де  $R$  і  $X = 1/(2 \cdot \pi \cdot F \cdot C_x)$  – відповідно його активна і реактивна складові.

Якщо втрати малі, тобто  $R \ll X$ , то ємність, яка вимірюється, визначається формулою:

$$C_x = I/(2 \cdot \pi \cdot F \cdot U). \quad (8)$$

Схема на рис.6, а, дає досить точні результати при вимірюванні великих ємностей, опір яких  $X$  значно менше вхідного опору вольтметра  $V$ . Схема на рис. 6, б, застосовується для вимірювання менших ємностей, опір яких в десятки і більше разів перевищує опір міліамперметра  $mA$ . Припустимо, що потрібно вимірювати ємності в межах  $0,1-1$  мкФ на частоті  $50$  Гц при наявності міліамперметра змінного струму на  $3$  мА. Так як опір цих ємностей  $X = 3200...32000$  Ом у багато разів більше будь-якого можливого опору міліамперметра, то вимірювання слід проводити за схемою на рис. 6, б, при напрузі живлення  $U \geq I \cdot X = 0,003 \cdot 3200 \approx 10$  В.

Схема на рис. 6, а може бути застосована і для вимірювання ємностей електролітичних конденсаторів. Якщо напруга живлення не перевищує  $1-2$  В, то вимір допустимо проводити при установці перемикача  $B$  в положення 1. При великих змінних напругах можливе пошкодження конденсаторів внаслідок розкладання електроліту. Ця небезпека усувається, якщо перемикач  $B$  встановити в положення 2. При цьому послідовно з джерелом змінного струму частоти  $F$  включається джерело постійного струму, напруга на затискачах якого  $U_0$  має перевищувати амплітуду змінної напруги. Тоді в ланцюзі буде діяти пульсуюча напруга, безпечна для конденсатора за умови правильної полярності його включення в схему. Пульсуючу напругу можна також отримати при послідовному включенні в вимірювальну схему діода. У всіх випадках вольтметр  $V$  і міліамперметр  $mA$  повинні вимірювати лише змінні складові напруги і струму, для чого вони виконуються із закритою схемою входу.

**Висновки.** Встановлено, що при малих частотах динамічного навантаження розмах відхилень товщини шару мастила від середнього розрахункового значення збільшується, а при великих частотах – зменшується внаслідок значного ефекту демпфуючого мастильного шару.

У міру збільшення частоти ударних взаємодій мастильний шар високошвидкісних зубчастих передач з асиметричним профілем перестає реагувати на зміну тиску, а величина навантаження, що визначає найменшу в часі товщину шару, наближається до мінімальної стаціонарної складової спектра динамічних навантажень. Одночасно дещо зменшуються рівні шуму та вібрацій.

Отже, у розрахунках на міцність, на контактну витривалість і на заїдання високошвидкісних зубчастих передачах з асиметричним профілем комплексний вплив критеріальних параметрів мастила необхідно враховувати не тільки при визначенні допустимих напруг, але і при встановленні величини динамічного посилення навантаження через ударну взаємодію зубів.

#### Список літератури

1. A.L. Kapelevich, "Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth", Mechanism and Machine Theory, 2000, Issue 35, pp. 117-130.
2. F.W. Brown, S.R. Davidson, D.B. Hanes and D.J. Weires, A. L. Kapelevich, Analysis and Testing of Gears with Asymmetric Involute Tooth Form and Optimized Fillet Form for Potential Application in Helicopter Main Drives, Gear Technology, June/July 2011, 46 – 55.
3. A.S. Novikov, A.G. Paikin, V.L. Dorofeyev, V.M. Ananiev, A.L. Kapelevich, Application of Gears with Asymmetric Teeth in Turbo-prop Engine



Gearbox, Gear Technology, January/February 2008, 60 - 65.

4. Gutyrya S. System Modeling of Gears Design Quality / Gutyrya S., Zablonsky K., Yaglinsky V. // VDI- Berichte. — Dusseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005. — № 1904. — P. 417 — 434.
5. Дроздов Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков Н. — М.: Машиностроение, 1986. — 223 с.
6. Заблонский К.И. Совершенствование и стандартизация расчетов нагрузочной способности зубчатых передач / Заблонский К.И., Филипович С.И. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып. 1(7). — С. 33 — 37.
7. Castro J.D. Power dissipation-temperature scuffing criterion for FZG / Castro J.D., Seabra J.H // VDI- Berichte. — Dusseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005. — № 1904. — P. 1165 — 1184.
8. DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnradern. — Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1987. — 120 s.
9. Гутыря С.С. Влияние основных параметров смазки на технический уровень высоконагруженного глобоидного редуктора / Гутыря С.С., Попель О.Е. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1997. — Вып. 1(4). — С. 84 — 87.
10. Гутыря С.С., Моделирование динамического нагружения зубьев передач зацеплением / Гутыря С., Мотулько Б.В., Трошинский Д.Д. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2005. — Вып. 1(23). — С. 25 — 28.
11. Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковортний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технічні передумови деформації і рушення зрізуючого шару при швидкісному зубофрезуванні загартованих циліндричних зубчатих 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.
12. Kamchatna - Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large-modular gears / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naydenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. - London. United Kingdom, 2021. — Vol. 9, Issue 1. — № 9. - P. 30 – 37.

#### References (transliterated):

1. A.L. Kapelevich, "Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth", Mechanism and Machine Theory, 2000, Issue 35, pp. 117-130.
2. F.W. Brown, S.R. Davidson, D.B. Hanes and D.J. Weires, A. L. Kapelevich, Analysis and Testing of Gears with Asymmetric Involute Tooth Form and Optimized Fillet Form for Potential Application in Helicopter Main Drives, Gear Technology, June/July 2011, 46 – 55.
3. A.S. Novikov, A.G. Paikin, V.L. Dorofeyev, V.M. Ananiev, A.L. Kapelevich, Application of Gears with Asymmetric Teeth in Turbo-prop Engine Gearbox, Gear Technology, January/February 2008, 60 - 65.
4. Gutyrya S. System Modeling of Gears Design Quality / Gutyrya S., Zablonsky K., Yaglinsky V. // VDI- Berichte. — Dusseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005. — # 1904. — P. 417 — 434.
5. Drozdov Yu.N. Trenie i iznos v ekstremal'nykh usloviyakh / Drozdov Yu.N., Pavlov V.G., Puchkov N. — M.: Mashinostroenie, 1986. — 223 s.
6. Zablonskiy K.I. Sovershenstvovanie i standartizatsiya raschetov nagruzochnoy sposobnosti zubchatykh peredach / Zablonskiy K.I., Filipovich S.I. // Tr. Odes. politekhn. un-ta. — Odessa, 1999. — Vy`p. 1(7). — S. 33 — 37.
7. Castro J.D. Power dissipation-temperature scuffing criterion for FZG / Castro J.D., Seabra J.H // VDI- Berichte. — Dusseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005. — # 1904. — P. 1165 — 1184.
8. DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnradern. — Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1987. — 120 s.
9. Guty`rya S.S. Vliyanie osnovny`kh parametrov smazki na tekhnicheskij uroven` vy`sokonagruzhennogo globoidnogo reduktora / Guty`rya S.S., Popel` O.E. // Tr. Odes. politekhn. un-ta. — Odessa, 1997. — Vy`p. 1(4). — S. 84 — 87.
10. Guty`rya S.S., Modelirovanie dinamicheskogo nagruzeniya zub`ev peredach zacepleniem / Guty`rya S., Motul`ko B.V., Troshhinskiy D.D. // Tr. Odes. politekhn. un-ta. — Odessa, 2005. — Vy`p. 1(23). — S. 25 — 28.
11. Klochko O.O., Gasanov M.G., Zakovorotnij O.Yu., Majboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnologični` peredumovi deformaczi`yi i`rushennya zri`zuyemogo sharu pri shvidki`snomu zubofrezuvanni` zagartovanih czilindricheskikh zubchatikh koli`s na osnovi` atomnogo pi`dkhi`du // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu «KhPI». Seri`ya: Tekhnologii`yi v mashinobuduvanni` = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nacz. tekhn. un-t «Kharkiv`v. poli` tekhn. i`n-t». — Kharkiv`v : NTU «KhPI», 2022. — # 1 (5) 2022. — S. 10–20. — ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02.
12. Kamchatna - Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large-modular gears / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naydenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. London. United Kingdom, 2021. — Vol. 9, Issue 1. — # 9. P. 30 – 37.

Поступила (received) 10.04.2022

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Ключко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr Oleksandrovych)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: [ukrstantko21@ukr.net](mailto:ukrstantko21@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2841-9455

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

**Охрименко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr Anatoliyovych)** – 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](mailto:alexhobs77@gmail.com), ORCID: 0000-0002-5446-6987

**Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrii Sergiyovych)** - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна; e-mail: [The.manokhin@gmail.com](mailto:The.manokhin@gmail.com); ORCID: 0000-0003-1479-8482

**Пермяков Егор Олександрович (Permyakov Egor Oleksandrovych)** – магістр кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: [perm\\_a@i.ua](mailto:perm_a@i.ua), ORCID: 0000-0003-2843-6108.

УДК 621.6

DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).05

## МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ДОПОМІЖНИХ МАШИНОРУЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

У статті розглянута математична модель формування послідовності допоміжних машинно-ручних технологічних операцій при обробці виробів на металорізальних верстатах з використанням ручної праці, яка побудована на семантичних мережах і призначена для вбудовування в імітаційні моделі виробничої системи. Розглянуті основні передумови створення моделі формування допоміжних машинно-ручних технологічних операцій (МФ ДМРТО). Сформульовані наукові основи моделі МФ ДМРТО. Приведені схема розрахунку показників ВМРТО і алгоритм формування послідовності виконання допоміжних переходів. У системі MathCad 15 представлені модель формування МРТО і тестовий приклад розрахунків. Пропонується модель може бути використана при формуванні і розрахунку елементів технологічних процес з великою часткою використання ручної праці. Наприклад, в турбінобудуванні, авіабудуванні, при виготовленні важких металорізальних верстатів та ін.

**Ключові слова:** машинно-ручна операція, послідовність допоміжних переходів, імітаційне моделювання.

### SHELKOV O.M., GASANOV M.I., ZAKOVOROTNIY O.YU., HLAVCHEVA YU.M., LETYUK V.I., FEDENYUK D.V. MODEL OF FORMING AUXILIARY MACHINE-HAND TECHNOLOGICAL OPERATIONS

In the article the mathematical model of forming of sequence of auxiliary machine-hand technological operations is considered at treatment of wares on metal-cutting machine tools with the use of hand labour, built on semantic networks and intended for building in the simulation models of the productive system. Basic pre-conditions of creation of model of forming of auxiliary machine-hand technological operations (MF FAMTO) are considered in the article. Scientific bases of model of MF FAMTO are set forth. Resulted chart of calculation of indexes of FAMTO and algorithm of forming of sequence of implementation of auxiliary transitions. In the system MathCad 15 presented model of forming of FAMTO and test example. The offered model can be used for forming and calculation of elements technological process with the large stake of the use of hand labour. On an example, in building of turbines, aircraft building, at making of heavy metal-cutting machine tools and other

**Ключові слова:** машинно-ручна операція, послідовність допоміжних переходів, імітаційне моделювання.

**Вступ.** В умовах дрібносерійного виробництва, до якого відноситься виготовлення лопаток турбін, у виробничому процесі велику частку займають операції механічної обробки різанням із застосування ручної праці. (допоміжні машинно-ручні технологічні операції (МФ ДМРТО)). Значну частину робочого часу механічної операції обробки різанням (близько 40%) займають допоміжні операції з використанням ручної роботи. Для визначення продуктивності машинно-ручних технологічних операцій (МРТО), як правило, використовують укрупнені нормативи часу, які припускають значної помилки обчислень дійсної норми часу. Це пояснюється використанням шаблонів типових робочих ситуацій, які не враховують усіх особливостей техніко-організаційних умов проведення реальної технологічної операції.

Поліпшення процесу мікроелементного нормування можливо на шляху розробки автоматизованої системи проектування МРТО. Базовим елементом її функціональної структури повинна бути модель формування допоміжних машинно-ручних технологічних операцій.

**Постановка завдання дослідження.** Пошук маршруту обробки в МРТО є неоднозначним завданням навіть для простого робочого оточення, оскільки його виконавцем є людина, на яку впливають антропометричні і психофізіологічні чинники.

Наприклад, для робочого місця верстатника (рис. 1) граф-дерево можливих варіантів реалізації токарної МРТО має шість різних варіантів: f, e, d, c, b, a (рис 2).

Система мікроелементів робочих рухів допоміжного технологічного процесу дозволяє найдетальніше відобразити особливості проведення операції і здійснити її імітацію.

**Метою роботи** є підвищення ефективності операцій механічної обробки різанням, які реалізуються в умовах автоматизованих верстатних комплексів дрібносерійного виробництва за рахунок скорочення собівартості виробів шляхом формування раціональних організаційно-технологічних структур машинно-ручних технологічних операцій.

У зв'язку з цим, система технологічного проектування повинна забезпечувати багатоміністрне дрібносерійне виробництво адаптивною технологією, яка враховує його організаційно-технічні умови. Це дає можливість не лише своєчасно оцінити втрати часу але і спрогнозувати наступні виходячи з певних організаційно-технічних умов, що сприятиме розвитку потокового виробництва на дрібносерійних і серійних підприємствах при використанні найбільш ефективного оснащення і організації робочого місця.

**Аналіз проблеми.** У світі найбільше поширення отримали мікроелементні базові системи: MTM-1 [23] і Work - Factor [22]. Створені автоматизовані системи мікроелементного нормування : Most, Univation [30], Wocom4M - Data [28], Modapts [12, 24], Plus, TaskMaster 2000 [25] і інші.

Наприклад, в системі мікроелементного нормування БСМ-1 [212] формула залежності часу виконання мікроелемента визначається таким чином (1) :

$$T_i = K_i \cdot S^{\alpha_1} \cdot P^{\alpha_2} \cdot I^{\alpha_3} \cdot \varphi^{\alpha_4} \cdot L^{\alpha_5} \cdot D^{\alpha_6} \cdot F^{\alpha_7} \cdot K_{oc} \cdot K_k \cdot K_{op} \cdot K_y \cdot K_{ct} \cdot K_n \cdot K_r, \quad (1)$$

де:  $T_i$  – нормативная залежність для  $i$ -го мікроелемента;

$K_i$  – значення вектору кутових коефіцієнтів;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$  – значення показників міри, кількісних чинників;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$  – значення показників міри, кількісних чинників;

$K_{oc}$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру небезпеки;

$K_k$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру контролю ;  
 $K_{op}$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру орієнтації;  
 $K_y$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру зручності роботи;  
 $K_n$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру щільності з'єднання;  
 $K_{ст}$  – поправочний коефіцієнт, який враховує міру обмеженості переміщення;  
 $K_r$  – поправочний коефіцієнт на тип виробництва.

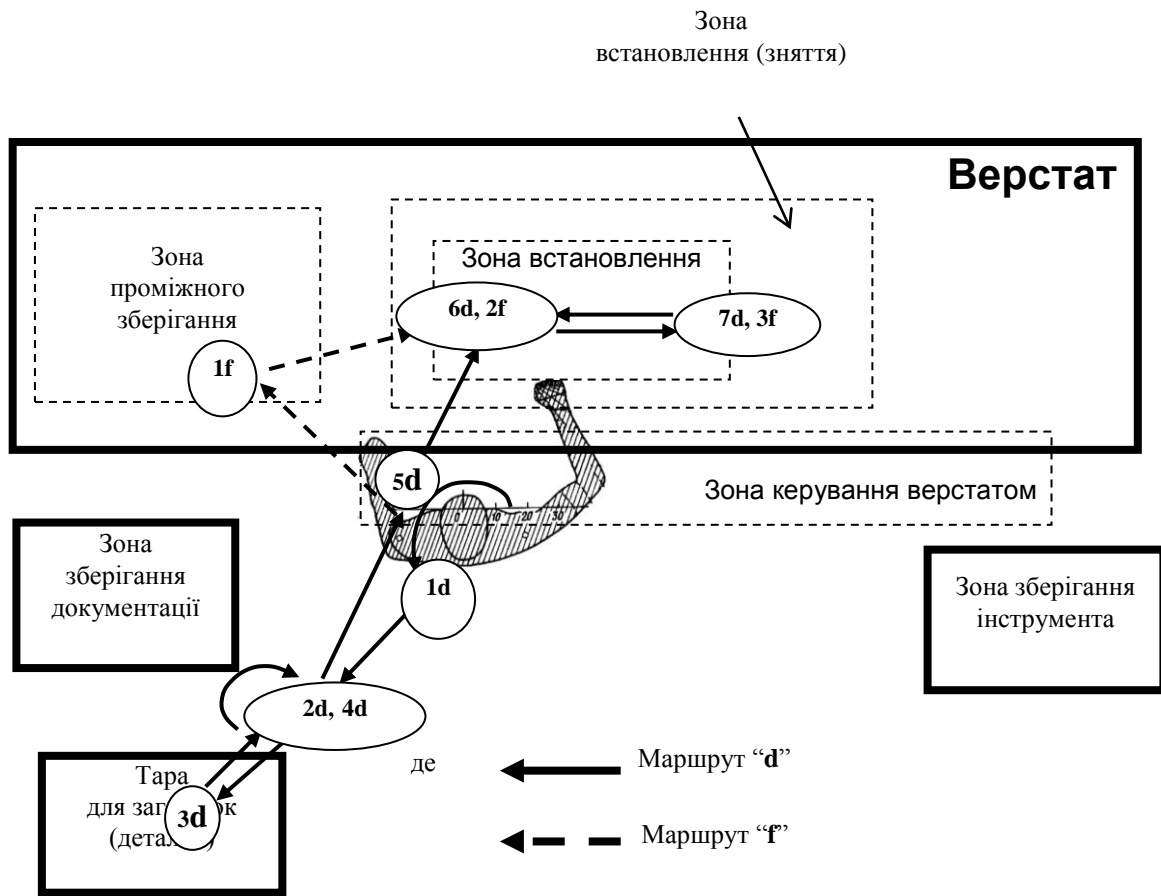


Рис. 1 – Фрагмент токарної операції «Встановлення в патроні з затиском заднім центром»

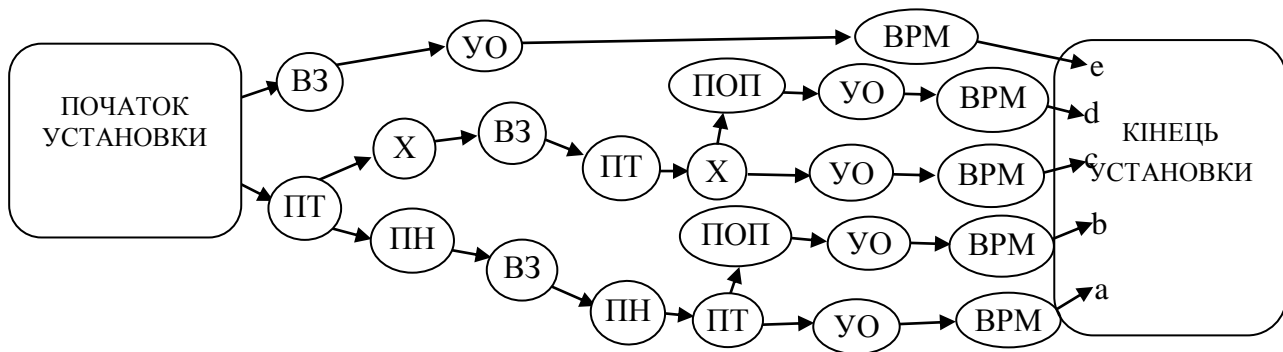


Рис. 2 – Граф-дерево можливих варіантів реалізації токарної операції "Установка в патроні з підтисканням заднім центром"

У систему мікроелементних нормативів часу БСМ-1 був закладений психофізіологічно допустимий рівень інтенсивності роботи, темпу роботи, при якому стомлення не перевищує допустимого порогу [2, 19, 20, 27, 32, 34].

Тут слід зазначити, що, що лежать в основі витрат часу на мікроелемент, залежності носять емпіричний характер, а значить їх застосування обмежене у рамках, вказаних в джерелі [2], діапазонів чинників, що враховуються. Відповідно і міра погрішності обчислення зростає у міру наближення значення, якого або з даних чинників, до межі врахованого для нього діапазону.

У БСМ-1 з обліком видів розрізняють 41 мікроелемент. З одного боку, кожному мікроелементу відповідає певна цільова спрямованість, а з іншого боку - тимчасова характеристика, яка відбиває залежність тривалості його виконання від набору чинників, що впливають (умов протікання трудового процесу).

Як запропоновано в джерелах [2, 18, 19, 26], усі мікроелементи можна розділити на основні і допоміжні (табл. 1).

Таблиця 1 – Перелік основних і допоміжних рухів

Основні рухи:	Допоміжні:
узяти (В);	протягнути руку (ПР);
встановити (У);	перемістити (П);
роз'єднати (Р);	перемістити (Х);
повернути (ПО);	повернути тулуб (ПТ);
обертати (ВР);	відпустити (ОТ);
натиснути рукою (НР);	нагнутися до підлоги (НП) ;
натиснути ногою (НН);	випрямитися (ВНП) та таке інше
встановити на розмір (УР).	

Основними мікроелементами є ті, які виражають основну мету в трудовому процесі, що проектується. Вони є визначальними елементами в трудовому процесі, навколо яких концентруються допоміжні, такі, що забезпечують їх виконання і зв'язок між ними.

Використання сучасних систем мікроелементного нормування допускає побудову схем робочого оточення і вимагає від нормувальника визначення усіх кількісних чинників для кожного мікроелемента на їх основі [5, 9, 13, 14, 15, 29, 35, 36].

Використання сучасних систем мікроелементного нормування допускає побудову схем робочого оточення і вимагає від нормувальника визначення усіх кількісних чинників для кожного мікроелемента на їх основі [1, 2, 19, 20, 27, 32, 34].

У сучасних системах автоматизованого проектування виробничих процесів спостерігається тенденція до створення моделей ситуацій реального виробництва з динамічним відображенням в реальному масштабі часу [16, 17, 21, 30, 31, 33, 37]. Аналіз і зміни роблять також безпосередньо над такими моделями, а не над абстрактними аналітичними або алгоритмічними описами, що дозволяє розробникові отримувати максимально повне уявлення про процеси, які відбуваються, і при цьому не заперечується необхідність, як в аналітичних, так і в алгоритмічних описах.

Для побудови подібних інформаційних систем треба мати в розпорядженні достатню кількість даних для обробки. У разі процесів допоміжної роботи, такою інформацією є інформація про властивості об'єктів робочого оточення у будь-який заданий момент часу, і про те, над якими об'єктами і залежно від яких умов необхідно виконувати ті або інші дії, а також сам характер цих дій, тому що значна їх частина може виконуватися людиною.

Белевським К.Е. [3 - 11] розроблені принципи співвідношення організації робочого місця з алгоритмічним описом робочих процесів. Також обґрунтована можливість, на основі цього опису, виконання інтерактивного імітаційного моделювання процесів роботи. Він дійшов висновку про те, що імітація усіх операцій, які впливають на модифікацію робочого оточення в алгоритмі імітаційного моделювання, недоцільна, оскільки надмірно його ускладнить і унеможливить подальше розширення складу операцій відповідно до вимог конкретного виробництва. Тому автором також розроблена уніфікована структура опису об'єктів-операцій, так у роботі С. А. Юровського, В. Х. Педро [19], трудовий процес пропонується будувати з моделей різного рівня укрупнення. Моделі між рівнями співвідносяться за допомогою зв'язків між ознаками, властивостями, чинниками.

**Математична модель.** Нижчий (перший) рівень укрупнення утворюють мікроелементні нормативи БСМ-1.

Другий рівень укрупнення (позначається буквою "А") представляють моделі, що відповідають простим трудовим діям з одним предметом. У основі їх побудови лежить віднесення до різних видів основних мікроелементів.

Третій рівень укрупнення (позначається буквою "Б") представлений типовими трудовими процесами, які відповідають трудовим прийомам, що виконуються з використанням одного предмета або засобу праці. Це об'єднання декількох моделей другого рівня укрупнення з використанням як зв'язки між ними мікроелементів. Виключення складають процеси типу "відкласти інструмент і узяти інший". Складається з 20 груп мікроелементів.

Четвертий рівень укрупнення (позначається буквою "К") – це моделі у більшості випадків, еквівалентні комплексам прийомів, роботи такого об'єму, що використовуються для опису елементів, як технологічні переходи (для певних верстатів, деталей і вживаних інструментів).

Виділяється 4 групи подібних моделей:

- першу групу складають моделі, в основі яких лежать трудові дії: ПР - протягнути руку і В - узяти. Вони формуються з найменувань базових моделей з додаванням найменувань мікроелементів, що входять до мікроелементної конструкції, яка доповнює її, наприклад (1)

$$\begin{array}{l}
 \text{M} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{O}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{A.B1} = \{ \ddot{I} \text{ D1} - \text{B1} \} \\
 \text{A.P1} = \{ \ddot{I} \text{ D1} - \text{B1} - \text{P1} \} \\
 \text{A.}\tilde{\text{O}}.\text{D1} = \{ \tilde{\text{O}} - \ddot{I} \text{ D1} - \text{B1} - \text{D1} \}
 \end{array}
 , \quad (2)$$

де B1 - узяти однією рукою;

B2 - узяти двома руками;

P1 - роз'єднати за допомогою однієї руки;

P2 - роз'єднати, вхопившись двома руками;

X - ходити.

- Другу групу складають базові моделі типу "перемістити" і "встановити на площину", до яких можуть бути додані мікроелементи "ходити" (X), "повернути тулуб" (ПТ) і ін. (3):

$$\begin{array}{l}
 \text{M} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{O}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{A.}\acute{\text{O}}\ddot{I} 1 = \{ \ddot{I} 1 - \acute{\text{O}}\ddot{I} 1 - \hat{I} \acute{\text{O}} \} \\
 \text{A.}\acute{\text{O}}\hat{I} 1 = \{ \ddot{I} 1 - \acute{\text{O}}\hat{I} 1 - \hat{I} \acute{\text{O}} \} \\
 \text{A.}\ddot{I} \acute{\text{O}}\acute{\text{O}}\ddot{I} 1 = \{ \ddot{I} \acute{\text{O}} - \ddot{I} 1 - \acute{\text{O}}\hat{I} 1 - \hat{I} \acute{\text{O}} \}
 \end{array}
 , \quad (3)$$

де УП1 - встановити на площину однією рукою (двома руками);

П1 - перемістити за допомогою однієї руки (двох рук);

УО1 - встановити в отвір однією рукою;

ОТ - відпустити.

- Третя група моделей другого рівня базується на дії ПР-В (протягнути руку і узяти). Її головну частину складають мікроелементи (4):

$$\begin{array}{l}
 \text{M} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{O}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{A.}\ddot{I} \hat{I} \tilde{\text{A}}1 = \{ \ddot{I} \text{ D1} - \text{B1} - \ddot{I} \hat{I} - \hat{I} \acute{\text{O}} \} \\
 \text{A.}\ddot{I} \hat{I} \tilde{\text{A}}2 = \{ \ddot{I} \text{ D2} - \hat{\text{A}}2 - \ddot{I} \hat{I} \tilde{\text{A}}2 - \hat{I} \acute{\text{O}}1 \}
 \end{array}
 , \quad (4)$$

де ПОГ - повернути предмет в горизонтальній площині;

ПОВ - повернути предмет у вертикальній площині;

ППР - повернути руків'я;

ПП - перемістити по поверхні.

- Четверту групу складають наступні мікроелементи на основі НР(5) :

$$\begin{array}{l}
 \text{M} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{H} \\
 \text{O}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{A.}\acute{\text{I}} \text{ D1} = \{ \ddot{I} \text{ D1} - \acute{\text{I}} \text{ D1} - \hat{I} \acute{\text{O}} \} \\
 \text{A.}\acute{\text{I}} \text{ D2} = \{ \ddot{I} \text{ D2} - \acute{\text{I}} \text{ D2} - \hat{I} \acute{\text{O}} \}
 \end{array}
 , \quad (5)$$

Таким чином, послідовність формування МРТО можна представити у вигляді графа (рис. 3).

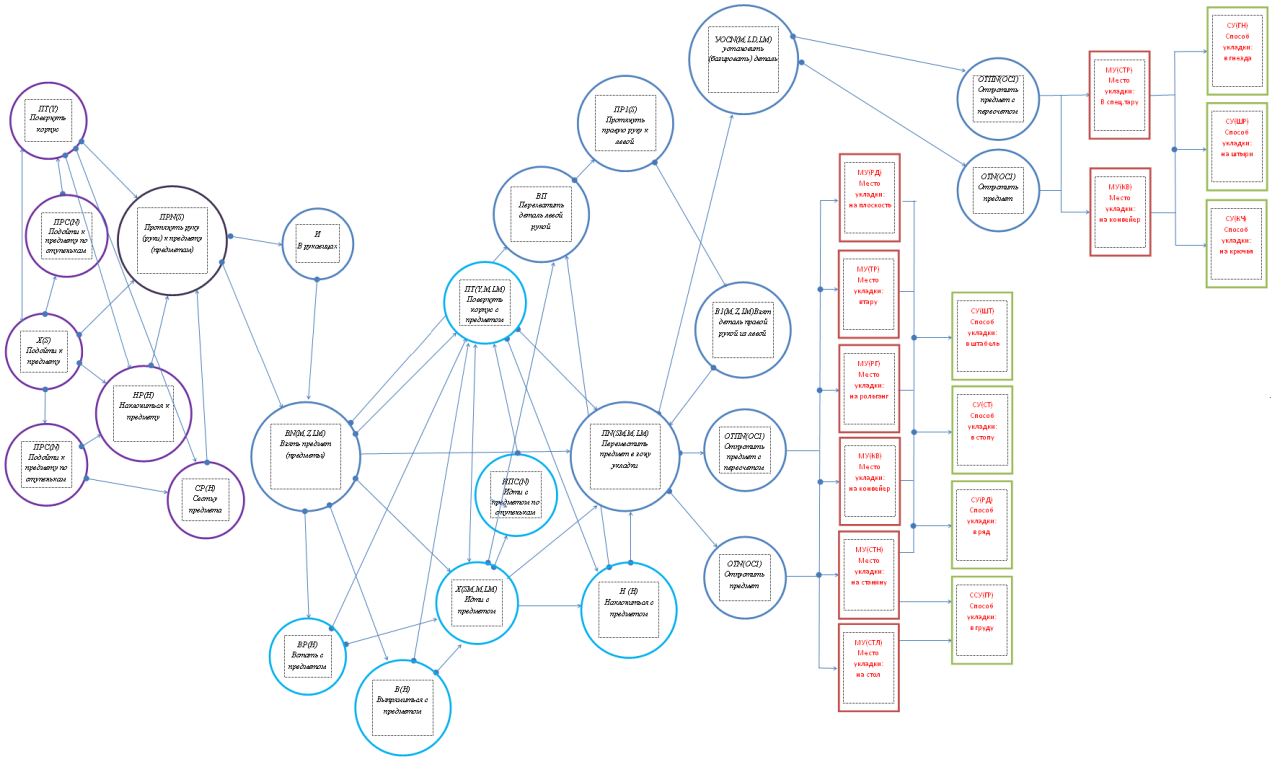


Рис. 3 – Граф-дерево послідовності формування МРТО

Таким чином, інформаційний зміст технології механічної обробки різанням, залежно від міри його дії на процес формування технологічної операції, можна розбити на:

**Постійні чинники:** опис операції - джерело інформації : карта інструкції; опис організації робочого місця - джерело інформації : технологічний процес, планування робочого місця; опис основного устаткування - джерело інформації : технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція і так далі), рис. 4, а.

**Умовно постійні чинники:** опис основного пристосування - джерело інформації : технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція пристосування (верстата) та ін.); опис основного і допоміжного інструментів - джерело інформації : технічна література, документація; опис засобу виміру - джерело інформації : паспорт, технічна література, документація, рис. 4, б.

**Змінні чинники:** опис об'єкту "виріб" - джерело інформації : технологічний процес обробки, креслення заготівлі і деталі; опис положень основних інструментів відносно оброблюваної заготівлі - джерело інформації : технологічна операція, робоча програма, рис. 5.

Тоді цільова ситуація може змінюватися не повністю, а частково - відповідно до деякої включеності технологічно значимих заходів у рамках операцій і переходів:

$$\langle \text{дія} \rangle \subset \langle \text{перехід} \rangle \subset \langle \text{операція} \rangle. \quad (6)$$

У рамках типової машинно-ручної технологічної операції (МРТО) час її виконання  $T_{i \text{ вді}}$  має функціональну залежність (7)

$$T_{i \text{ вді}} = f \left[ \begin{aligned} &\ddot{A}(m, \tilde{A}, \hat{O}), \ddot{\delta}\delta\delta\delta(N_{i i A}, \hat{E}\hat{a}\hat{\div}), \hat{I}_{\delta\pi}(\hat{O}, \hat{E}i\hat{o}), \\ &\hat{I}\tilde{\pi}(\tilde{N}\hat{O}, \hat{I}\hat{D}, \hat{A}\hat{E}, \hat{D}\hat{E}, \tilde{N}\hat{E}), \hat{I}\delta\alpha(\hat{O}\delta\delta\delta\delta\tilde{\pi}, \hat{E}i\hat{a}, \hat{I}\hat{E}) \end{aligned} \right], \quad (7)$$

де  $\ddot{A}(m, \tilde{A}, \hat{O})$  - параметри, що описують деталь: масу, габарити, форму;  $\ddot{\delta}\delta\delta\delta(N_{i i A}, \hat{E}\hat{a}\hat{\div})$  - параметри, що описують технологічну трудомісткість обробки : кількість оброблюваних поверхонь на цій операції, якість обробки кожної поверхні (квалітет, чистота);  $\hat{I}_{\delta\pi}(\hat{O}, \hat{E}i\hat{o})$  - надійність реалізації МРТО, залежна від стану виконавця за параметрами фізичної і інформаційної напруженості;  $\hat{I}\tilde{\pi}(\tilde{N}\hat{O}, \hat{I}\hat{D}, \hat{A}\hat{E}, \hat{D}\hat{E}, \tilde{N}\hat{E})$  - параметри, що описують основне технологічне оснащення : верстат, пристосування, допоміжний, різальний, вимірювальний інструменти;  $\hat{I}\delta\alpha(\hat{O}\delta\delta\delta\delta\tilde{\pi}, \hat{E}i\hat{a}, \hat{I}\hat{E})$  - чинники, визначувані організацією робочого місця : транспортно-складською системою, інвентарем, типом планування ділянки обробки.

### А) Постійні чинники

МП = 1

$$\text{Трасса} = \begin{pmatrix} \text{"Nt"} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \text{"Xt"} & 0 & 4 & 7 & 10 & 10 & 12 \\ \text{"Yt"} & 0 & 0 & 2 & 2 & -1 & -2 \\ \text{"Zt"} & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 \\ \text{"Nct"} & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Пп} = \begin{pmatrix} \text{"ТЗП"} & 3 \\ \text{"ППЗУ"} & \text{ППЗУ} \\ \text{"Ft,град"} & 15 \\ \text{"СУ"} & \text{СУ} \\ \text{"МУ"} & \text{МУ} \\ \text{"МП,к"} & \text{МП} \\ \text{"ТУП"} & 6 \\ \text{"Ft,град"} & 10 \\ \text{"ПМУП"} & \text{ПМУП} \end{pmatrix}$$

$$\text{Пп} = \begin{pmatrix} \text{"ТЗП"} & 3 \\ \text{"ППЗУ"} & 1 \\ \text{"Ft,град"} & 15 \\ \text{"СУ"} & 1 \\ \text{"МУ"} & 1 \\ \text{"МП,к"} & 1 \\ \text{"ТУП"} & 6 \\ \text{"Ft,град"} & 10 \\ \text{"ПМУП"} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Пч} = \begin{pmatrix} \text{"Nt- номер точки"} & 1 \\ \text{"Ft,град"} & 30 \\ \text{"P"} & \text{P} \\ \text{"ч"} & \text{ч} \\ \text{"УЗП"} & \text{УЗП} \\ \text{"УУП"} & \text{УУП} \\ \text{"Кпр"} & 2 \\ \text{"Пр"} & \text{Пр} \end{pmatrix}$$

$$\text{Пч} = \begin{pmatrix} \text{"Nt- номер точки"} & 1 \\ \text{"Ft,град"} & 30 \\ \text{"P"} & 1 \\ \text{"ч"} & 1 \\ \text{"УЗП"} & 1 \\ \text{"УУП"} & 1 \\ \text{"Кпр"} & 2 \\ \text{"Пр"} & 1 \end{pmatrix}$$

Переход :=

0	0
1	"Повернуть корпус"
2	"Подойти к предмету (предметам)"
3	"Подойти к предмету (предметам) по ступенькам"
4	"Наклониться к предмету (предметам)"
5	"Сесть у предмета (предметов)"
6	"Протянуть правую руку к предмету"
7	"Протянуть руки к предмету (предметам)"
8	"Взять предмет (предметы)"
9	"Встать с предметом (предметами)"
10	"Выпрямиться с предметом (предметами)"
11	"Повернуть корпус с предметом (предметами)"
12	"Идти с предметом (предметами) в руках"
13	"Идти с предметом (предметами) в руках по ступенькам"
14	"Сесть с предметом (предметами)"
15	"Наклониться с предметом (предметами) в руках"
16	"Перехватить предмет левой рукой"
17	"Протянуть правую руку к левой"
18	"Взят предмет правой рукой из левой"
19	"Переместить предмет в зону укладки"
20	"Установить (базировать) предмет"
21	"Опустить предмет (предметы)"
22	"Опустить предмет (предметы) с пересчетом"
23	"Выпрямиться без предмета"
24	"Встать без предмета"

### Б) Умовно постійні чинники

МС :=	"0.Пп"	1	2	3	4	5	6	6	6	7	7	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	15	15	15	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	18	18	18	19	20	21	22	23	24					
	"1.СУ"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0	0	0	0	0	0					
	"2.ППЗУ"	0	0	0	1	2	4	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	"3.ч"	4	3	3	2	2	2	2	5	6	2	2	5	6	0	0	6	5	9	8	8	2	2	10	10	2	2	2	10	10	10	11	11	11	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	14	
	"4.P"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	"5.ТP"	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	"6.УЗП"	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	"7.Крук"	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	"8.Пр"	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	"9.УУП"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"10.ПМУП"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис. 4 – Інформаційний зміст технології механічної обробки різанням, залежно від міри його дії на процес формування технологічної операції: постійні (а) і умовно постійні (б) чинники

З цих позицій, конкретна МРТО - інформація, що управляє, для елементарною виробничою системою, яка є часовою стратегією виконання операції. При цьому домагаються, щоб реалізувалась цільова функція (7)

$$T_{\text{МРТО}} \rightarrow \min . \tag{7}$$

У міру накопичення досвіду роботи, за кожною групою дій закріплюється локальна база даних і знань про деяку підмножину елементів оснащення, стосунків робочого середовища і сценарію її розгортання в технологічному комплексі. МРТО складається з деякої комбінації таких груп (рис.3).

Для здійснення управління машинно-ручним виробничим процесом всякий раз динамічно формується підмножина елементарних систем, які управляють усією множиною цих систем - робочих груп дій. Ці системи є елементарними алгоритмами управління технологічними комплексами (рис. 6).

**Висновки.** На основі аналіз взаємозв'язку властивостей технологічного оснащення з виконуваними машинно-ручними технологічними операціями здійснена формалізація організаційно-технічних характеристик робочого місця верстатника за технологічними ознаками у вигляді нечітких семантичних мереж.

Описана спрощена модель розрахунку часу виконання мікроелементів з урахуванням ергономічних властивостей робочого місця.

Приведено математичне визначення поняття і опис структури моделі МРТО.

Запропонована модель може бути використана при імітаційному моделюванні автоматизованих виробничих систем обробки металів різанням з використанням ручної праці на рівнях: верстат ділянка, лінія.



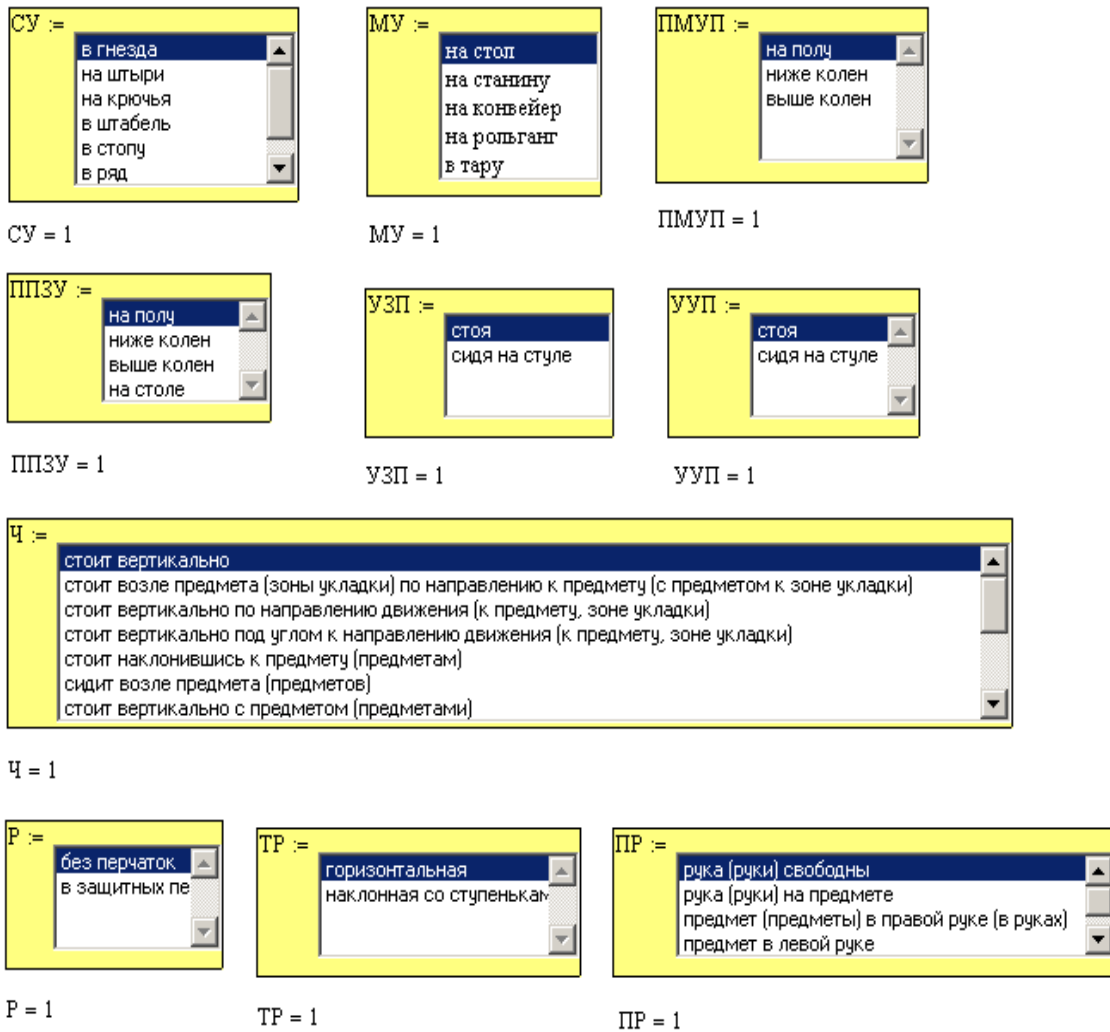


Рис. 5 – Інформаційний зміст технології механічної обробки різанням, залежно від міри його дії на процес формування технологічної операції: змінні чинники

```

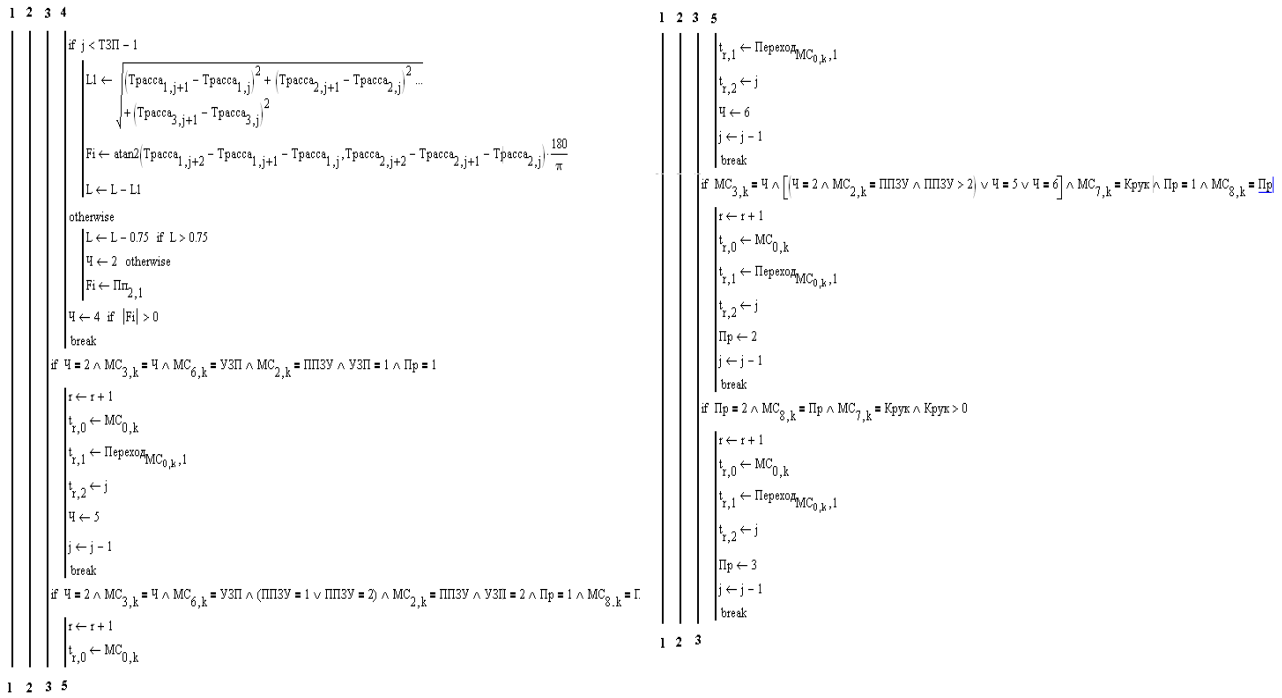
tp :=
r ← 0
t ← 0
ПМУП ← Пп8,1
Пр ← Пч7,1
Кпр ← Пч6,1
Круж ← 1
Круж ← 2 if Пп5,1 > 2.5 ∨ Кпр > 1
Круж ← 0 if Пп5,1 · Кпр > 20 ∨ Пп5,1 · Кпр < 0.1
Ч ← Пч3,1
СУ ← Пп3,1
ППЗУ ← Пп1,1
Fi ← Пч1,1
Р ← Пч2,1
МУ ← Пп4,1
L ← 0
ТУП ← Пп6,1
ТЗП ← Пп0,1
УЗП ← Пч4,1
УУП ← Пч5,1
for j ∈ 1,2.. ТЗП - 1
  L ← L + √((Трасса1,j+1 - Трасса1,j)² + (Трасса2,j+1 - Трасса2,j)²)
  + √((Трасса3,j+1 - Трасса3,j)²)
1

1
j ← 1
while j < ТУП + 1
  for k ∈ 1,2.. cols(MC) - 1
    if (Ч = 13 ∨ Ч = 14) ∧ MC3,k = Ч ∧ Пр = 1 ∧ j < ТЗП
      r ← r + 1
      tr,0 ← MC0,k
      tr,1 ← ПереходMC0,k,1
      tr,2 ← j
      Ч ← 1
      j ← j - 1
      break
    if Ч = 1
      Ч ← 4 if |Fi| > 0
      Ч ← 3 otherwise
      j ← j - 1
      break
    if Ч = 4 ∧ MC3,k = Ч ∧ Пр = 1
      r ← r + 1
      tr,0 ← MC0,k
      tr,1 ← ПереходMC0,k,1
      tr,2 ← j
      Ч ← 1
      j ← j - 1
      break
1 2 3

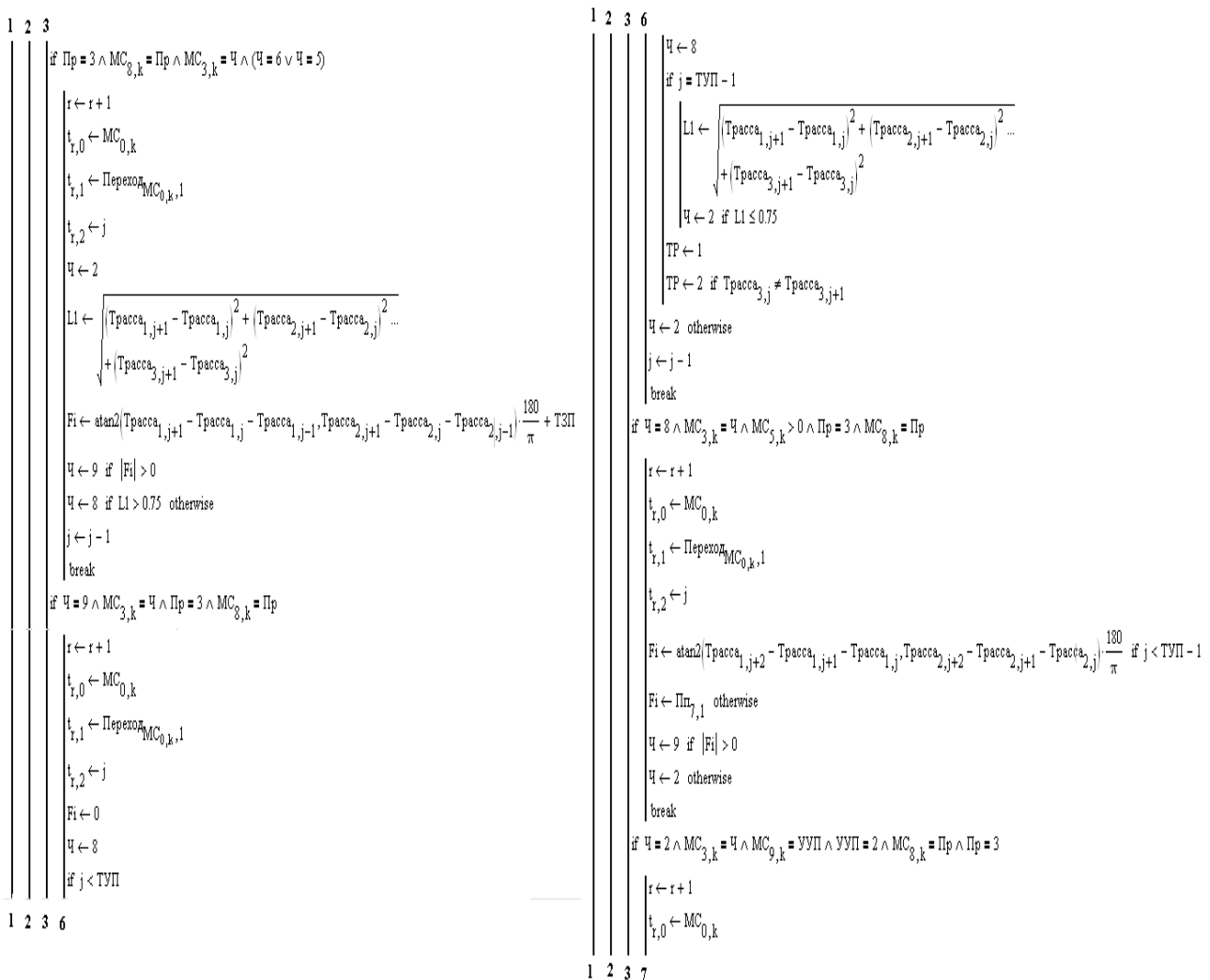
1 2 3
if Ч = 1
  Ч ← 4 if |Fi| > 0
  Ч ← 3 otherwise
  j ← j - 1
  break
if Ч = 4 ∧ MC3,k = Ч ∧ Пр = 1
  r ← r + 1
  tr,0 ← MC0,k
  tr,1 ← ПереходMC0,k,1
  tr,2 ← j
  Fi ← 0
  Ч ← 2
  if j < ТЗП
    Ч ← 3
    ТР ← 2 if Трасса3,j ≠ Трасса3,j+1
    ТР ← 1 otherwise
  j ← j - 1
  break
if Ч = 3 ∧ MC3,k = Ч ∧ MC5,k > 0 ∧ Пр = 1
  r ← r + 1
  tr,0 ← MC0,k
  tr,1 ← ПереходMC0,k,1
  tr,2 ← j
1 2 3 4

```

### А. Підготовка вхідних і базових даних



**Б. Розрахунок логістичних параметрів операції**  
**Рис. 6 – Модель формування допоміжних машинно-ручних технологічних операцій**



### В. Нормування МРТО

```

1 2 3 7
tr,1 ← ПереходMC0,k,1
tr,2 ← j
Ч ← 10
j ← j - 1
break
if Ч = 2 ∧ MC3,k = Ч ∧ MC10,k = ПМУП ∧ (ПМУП = 1 ∨ ПМУП = 2) ∧ MC8,k = Пр ∧ Пр = 3
    r ← r + 1
    tr,0 ← MC0,k
    tr,1 ← ПереходMC0,k,1
    tr,2 ← j
    Ч ← 12
    j ← j - 1
    break
if Ч = 10 ∧ MC3,k = Ч ∧ MC10,k = ПМУП ∧ (ПМУП = 1 ∨ ПМУП = 2) ∧ MC8,k = Пр ∧ Пр = 3
    r ← r + 1
    tr,0 ← MC0,k
    tr,1 ← ПереходMC0,k,1
    tr,2 ← j
    Ч ← 11
    j ← j - 1
    break
if Кпр > 1 ∧ (СУ ≥ 1 ∧ СУ ≤ 3) ∧ MC1,k = СУ ∧ MC8,k = Пр ∧ Пр = 3 ∧ (Ч = 2 ∨ Ч = 10 ∨ Ч = 11 ∨ Ч = 12) ∧ MC3,k = Ч
    r ← r + 1
    tr,0 ← MC0,k
1 2 3 8
tr,1 ← ПереходMC0,k,1
tr,2 ← j
Пр ← 4
j ← j - 1
break
if MC8,k = Пр ∧ Пр = 4 ∧ [Кпр > 1 ∧ (СУ ≥ 1 ∧ СУ ≤ 3) ∧ MC1,k = СУ]
    r ← r + 1
    tr,0 ← MC0,k
    tr,1 ← ПереходMC0,k,1
    tr,2 ← j
    Пр ← 5
    j ← j - 1
    break
if MC8,k = Пр ∧ Пр = 5 ∧ [Кпр > 1 ∧ (СУ ≥ 1 ∧ СУ ≤ 3) ∧ MC1,k = СУ]
    r ← r + 1
    tr,0 ← MC0,k
    tr,1 ← ПереходMC0,k,1
    tr,2 ← j
    Пр ← 6
    j ← j - 1
    break
j ← j + 1
t

```

Г. Розрахунок маршруту переміщенні елементів МРТО та вивід результатів розрахунків  
Закінчення рис. 6.

	0	1	2
0	0		0
1	1	"Повернуть корпус"	1
2	2	"Подойти к предмету (предметам)"	1
3	1	"Повернуть корпус"	2
4	2	"Подойти к предмету (предметам)"	2
5	1	"Повернуть корпус"	3
6	4	"Наклониться к предмету (предметам)"	3
7	7	"Протянуть руки к предмету (предметам)"	3
8	8	"Взять предмет (предметы)"	3
9	10	"Выпрямиться с предметом (предметами)"	3
10	11	"Повернуть корпус с предметом (предметами)"	3
11	12	"Идти с предметом (предметами) в руках"	3
12	11	"Повернуть корпус с предметом (предметами)"	4
13	12	"Идти с предметом (предметами) в руках"	4
14	11	"Повернуть корпус с предметом (предметами)"	5
15	12	"Идти с предметом (предметами) в руках"	5
16	11	"Повернуть корпус с предметом (предметами)"	6
17	15	"Наклониться с предметом (предметами) в руках"	6
18	16	"Перехватить предмет левой рукой"	6
19	17	"Протянуть правую руку к левой"	6
20	18	"Взят предмет правой рукой из левой"	6
21			
22			

Рис. 7 – Результати формування допоміжних машинно-ручних технологічних операцій за моделлю(рис. 6)

## Список литературы

1. Арон Е.И. Микроэлементное нормирование и проектирование труда / Арон Е. И., Калитич Г. И. — К.: Техніка, 1983. — 89 с. — (Б-ка передового опыта. Передовые предприятия).
2. Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1). Нормативно производственное издание / голов. ред. С.А. Юровский — М.: Экономика — 1989 г. — (Методические и нормативные материалы)
3. Більовський К.Е. Аналіз відхилень при спрощенні структур рухів в автоматизованій системі нормування та оплати праці. / Більовський К.Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2001 №2 ч.3 — С. 128 — 131.
4. Більовський К.Е. Аналіз систем нормування і вимоги до моделювання процесів праці / Більовський К.Е. // Економіка праці: [Зб., наук., праць.] — МО України. Технологічний ун-т Поділля. — Хмельницький: НВП "Еврика" — Вип. 3 — 1999. — С.5 — 9.
5. Більовський К.Е. Визначення відхилень тривалості процесів праці в залежності від розмірів та розташування зон розміщення предметів. / Більовський К. Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2003 №2 Т.2 — С. 161 — 164.
6. Більовський К.Е. Дослідження структур трудових комплексів для побудови автоматизованих систем розробки нормативів та нормування. / Більовський К. Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2000 №2 — С. 69 — 72.
7. Більовський К.Е. Застосування інтерактивного імітаційного моделювання для аналізу трудових процесів / Більовський К.Е. Застосування нових інформаційних технологій для аналізу, проектування та нормування трудових процесів / Більовський К.Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2002 — №2 ч.1 — С. 74 — 81.
8. Більовський К.Е. // Економіка проблеми теорії та практики. — Вип. 124. — 2002р — С. 165 — 173.
9. Більовський К. Е. Общая структура автоматизированной системы определения норм времени / Більовський К. Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2000 — №3 ч.1 — С. 40 — 43.
10. Більовський К.Е. Структура системи інтерактивного моделювання методів ручної і машинно-ручної праці: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. економічних наук: спец. 08.03.02. „Економіко математичне моделювання” / Більовський К.Е. Хмельницький-2003 — 18 с.
11. Більовський К.Е., Завгородня Т.П. Структура автоматизованої системи проектування та нормування трудових процесів / Більовський К.Е. // Вісник технологічного університету — Поділля, м. Хмельницький — 2001 №4 — С. 112 — 116.
12. Ведерников М.Д. Досвід розробки укрупнених нормативів часу на основі модульної системи мікроелементного нормування та проектування праці (МОДАПТС) (На прикладі поточно-конвеєрного виробництва) / Ведерников М.Д. // Економіка проблеми теорії та практики. Вип. 128 — 2002 — 53 — 59 с.
13. Завгородня Т.П. Моделювання процесів праці на рівні робочих місць. / Завгородня Т.П., Мазарчук А.Ю. // Вісник технологічного університету Поділля, м. Хмельницький №2 — 1998 — 76 — 80 с.
14. Завгородня Т.П. Проектирование технологии труда. / Завгородня Т.П. // Проблемы экономики труда: Украинская научно-практическая конференция. — Хмельницький, 1993 — 23 — 27 с.
15. Мазарчук А.Ю. Моделювання процесів праці. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. економічних наук: спец. 08.03.02. “Економіко-математичне моделювання” / Мазарчук А.Ю. — Хмельницький, 1998 — 15 с.
16. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. / Максимей И.В. — М.: Радио и связь, 1988 — 232 с.
17. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. / Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1990 — 272 с.
18. Методические основы нормирования труда рабочих в народном хозяйстве. / Изд. 3-е переработанное — М.: Экономика 1987.
19. Методические рекомендации по расчету на ЭВМ норм времени на базе микроэлементных нормативов / под ред., С.А. Юровского, В.Х. Педро // Нормативно-производственное издание. — М.: Экономика, 1989 — 54 с.
20. Мошенский М.Г. Микроэлементные нормативы и методы их укрупнения для исследования и нормирования трудовых процессов. / Мошенский М.Г. // Соц. Труд. 1975 — №3 — 78 — 94 с.
21. Назаретов В.М. Техническая имитация интеллекта Кн. 6. / В.М. Назаретов, Д.П. Ким; Под ред. И.М. Макарова. // Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн.: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1986. — 144 с.
22. Основы инженерной психологии: [ Под ред. Б.Ф. Ломова.] — М.: Высш. шк., 1986 — 448 с.
23. Офіційна сторінка “Асоціації МТМ для стандартизації і досліджень” (The MTM Association for Standards and Research). [Електронний ресурс]: <http://www.MTM.org/>
24. Офіційна сторінка “Міжнародної асоціації МОДАПТС” (International MODAPTS Association). [Електронний ресурс]: <http://www.modapts.org/>
25. Офіційна сторінка системи TaskMaster 2000. [Електронний ресурс]: <http://www.Drshinnick.com/taskmaster.htm>
26. Перовицкий Ю.С. Трудовой процесс. (Инженерно-экономический поиск меры труда). / Перовицкий Ю.С. — Ижевск “Удмуртия”, 1974 — 186 с.
27. Применение базовой системы микроэлементных нормативов времени (БСМ) в организации и нормировании труда рабочих: Методические рекомендации. — М.: НИИ труда, 1985.
28. Применение ЭВМ для расчета норм труда: Методические рекомендации. Вып. 4. / под ред. А.С.Довбы, В.М. Рысса и Р.П. Миусковой // Методы расчета норм времени на поточных линиях сборки. — М.: НИИ труда, 1979.
29. Ресурсосбережение в тяжелом машиностроении. Реинжиниринг крупногабаритных изделий: монография /В.Т. Лебедь, А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой. — Краматорск: ДГМА, 2015. — 301 с.
30. Ротштейн А.П. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. / Ротштейн А.П., Кузнецов П.Д. — К.: Техника, 1992 — 180 с.
31. Саломатин Н.А. Имитационное моделирование в оперативном управлении производством. / Н.А. Саломатин, Г.В. Беляев, В.Ф. Петрученко, Е.В. Прошлякова. — М.: Машиностроение, 1984. — 208 с.
32. Скрыпник Н. Автоматизированные системы микроэлементного проектирования и нормирования труда в развитых капиталистических странах. / Скрыпник Н., Горюнов В. // Соц. Труд, 1986 — №4 — 112 — 117 с.
33. Соломенцев Ю.М. Ситуативное проектирование технологических процессов в гибкой автоматизированной производственной системе. / Соломенцев Ю.М., Васин А.М., Климов С.В. — Вестник машиностроения, 1984 — № 3 — 47 — 50 с.
34. Турко Ф.М. Методика разработки внедрения микроэлементных нормативов трудовых процессов. (Методические рекомендации) / Турко Ф.М., Балушак Р.Г., Михайлов З.В. — К.: 1992 г.
35. Шелковой А., Ключко А., Набока Е. —Saarbrücken, Germany: LAPLAMBERTAcademicPublishing, 2015. — 528 с.
36. Шелковой А.Н., Шпрон Л.Б., Ищенко Г.И., Рузметов А.Р., Семченко М.С. К вопросу о имитационном моделировании машинно-ручных технологических операций в системах обработки металлов резанием //Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. — Вип. 10. — Харків : НТУ «ХПІ», 2015. — С. 177 — 191
37. Эргономика. Проблемы приспособления условий труда к человеку: Сборник статей. / Перев. с польск. — М.: Мир, 1971 г. — 421 с.

## References (transliterated)

1. Aron E.I. Mikroelementnoe normirovanie i proektirovanie truda / Aron E. I., Kalitich G. I. — K.: Tekhnika, 1983. — 89 s. — (B-ka peredovogo opyta. Peredovy'e predpriyatii).
2. Bazovaya sistema mikroelementnykh normativov vremeni (BSM-1). Normativno proizvodstvennoe izdanie / golov. red. S.A. Yurovskij — M.: Ekonomika p 1989 r. — (Metodicheskie i normativny'e materialy)
3. Bi'lovs'kij K.E. Analiz v' dkhilen' pri sproshhenni' struktur rukhi'v v avtomatizovani'j sistemi' normuvannya ta oplati praci' / Bi'lovs'kij K.E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2001 #2 ch.3 — S. 128 — 13.
4. Bi'lovs'kij K.E. Analiz sistem normirovaniya i trebovaniya k modelirovaniyu processov truda / Bi'lovs'kij K.E. // Ekonomika praci': [Zb., nauk., pracz.] — MO Ukraini. Tekhnologichnij un-t Podi'lyya. — Khmel'nicz'kij: NVP "Evri'ka" — Vip. 3 — 1999. — S.5 — 9.
5. Bi'lovs'kij K.E. Vznachennya v' dkhilen' trivalosti' procesi'v praci' v zalezhnosti' v' d rozmi'ri'v ta roztashuvannya zon rozmi' shhennya pre-dmeti'v. / Bi'lovs'kij K. E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2003 #2 T.2 — S. 161 — 164.
6. Bi'lovs'kij K.E. Dosli'dzhennya struktur trudovikh kompleksiv dlya pobudovi avtomatizovanih sistem rozrobki normativiv ta normuvannya. / Bi'lovs'kij K. E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2000 #2 — S. 69 — 72.
7. Bi'lovs'kij K.E. Zastosuvannya i nteraktivnogo i mi'taczi'jnogo modelyuvannya dlya analizu trudovikh procesi'v / Bi'lovs'kij K.E. Za-stosuvannya novikh i nformaczi'jnih tekhnologij dlya analizu, proektuvannya ta normuvannya trudovikh procesi'v / Bi'lovs'kij K.E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2002 — #2 ch.1 — S. 74 — 81.
8. Bi'lovs'kij K.E. // Ekonomika problemi teori'yi ta praktiki. — Vip 124. — 2002r — S. 165 — 173.
9. Bi'lovs'kij K. E. Obshhaya struktura avtomatizovanoj systemy' opredeleniya norm vremeni / Bi'lovs'kij K. E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2000 — #3 ch.1 — S. 40 — 43.
10. Bi'lovs'kij K.E. Struktura sistemi' nteraktivnogo modelyuvannya metodi'v ruchnoyi i mashinno-ruchnoyi praci': avtoref. dis. na zdo-buttya nauk, stupenya kand. ekonomichnih nauk: specz. 08.03.02. „Ekonomiko matematichne modelyuvannya" / Bi'lovs'kij K.E. Khmel'nicz'kij-2003 — 18 s..
11. Bi'lovs'kij K.E., Zavgorodnya T.P. Struktura avtomatizovanoj sistemi' proektuvannya ta normuvannya trudovikh procesi'v / Bi'lovs'kij K.E. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu — Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij — 2001 #4 — S. 112 — 116.
12. Vedernikov M.D. Dosvi'd rozrobki ukрупnenikh normativiv v chasu na osnovi' modul'noyi sistemi' mikroelementnogo normuvannya ta proektuvannya praci' (MODAPTS) (Na prikladi' potochno-konveyernogo virobnicztva) / Vedernikov M.D. // Ekonomika problemi teori'yi ta praktiki. Vip. 128 — 2002 — 53 — 59 s.
13. Zavgorodnya T.P. Modelyuvannya procesi'v praci' na ri'vni' robochikh mi'scz'. / Zavgorodnya T.P., Mazarchuk A.Yu. // Vi'snik tekhnologichnogo uni'versitetu Podi'lyya, m. Khmel'nicz'kij #2 — 1998 — 76 — 80 s.
14. Zavgorodnyaya T.P. Proektirovanie tekhnologii truda. / Zavgorodnyaya T.P. // Problemy' ekonomiki truda: Ukrainskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. — Khmel'nicz'kij, 1993 — 23 — 27 s.
15. Mazarchuk A.Yu. Modelyuvannya procesi'v praci'. avtoref. dis. na zdo-buttya nauk. stupenya kand. ekonomichnih nauk: specz. 08.03.02. "Ekonomiko-matematichne modelyuvannya" / Mazarchuk A.Yu. — Khmel'nicz'kij, 1998 — 15 s.
16. Maksimej I.V. Imitacziionnoe modelirovanie na E'VM. / Maksimej I.V. — M.: Radio i svyaz', 1988 — 232 s.
17. Melikhov A.N. Situacziionnye sovetuyushhie systemy' s nechetkoj logikoj. / Melikhov A.N., Bershtejn L.S., Korovin S.Ya. — M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat.lit., 1990 — 272 s.
18. Metodicheskie osnovy' normirovaniya truda rabochikh v narodnom khozjaystve. / Izd. 3-e pererabotannoe — M.: Ekonomika 1987.
19. Metodicheskie rekomendaczi' po raschetu na E'VM norm vremeni na baze mikroelementnykh normativov / pod red., S.A. Yurovskogo, V.Kh. Pedro // Normativno-proizvodstvennoe izdanie. — M.: Ekonomika, 1989 — 54 s.
20. Moshenskij M.G. Mikroelementny'e normativy' i metody' ikh ukрупneniya dlya issledovaniya i normirovaniya trudovykh processov. / Moshenskij M.G. // Socz. Trud. 1975 — #3 — 78 — 94 s.
21. Nazaretov V.M. Tekhnicheskaya imitacziya intellekta Kn. 6. / V.M. Nazaretov, D.P. Kim; Pod red. I.M. Makarova. // Robototekhnika i gibkie avtomatizirovanny'e proizvodstva. V 9-ti kn.: Ucheb. posobie dlya vtuzov. — M.: Vy'ssh. shk., 1986. — 144 s.
22. Osnovy' inzhenernoj psikhologii: [ Pod red. B.F. Lomova.] — M.: Vy'ssh. shk., 1986 — 448 s.
23. Ofi'czi'jna stori'nka "Asoczi'aczi'yi MTM dlya standartizaczi'yi i' dosli'dzhen'" (The MTM Association for Standards and Research). [Elektronnij resurs]: <http://www.MTM.org/>
24. Ofi'czi'jna stori'nka "Mi'zhnarodnoyi asoczi'aczi'yi MODAPTS" (International MODAPTS Association). [Elektronnij resurs]: <http://www.modapts.org/>
25. Ofi'czi'jna stori'nka sistemi TaskMaster 2000. [Elektronnij resurs]: <http://www.Drshinnick.com/taskmaster.htm>
26. Perevoshnikov Yu.S. Trudovoj process. (Inzhenerno-ekonomicheskij poisk mery' truda). / Perevoshnikov Yu.S. — Izhevsk "Udmurtiya", 1974 — 186 s.
27. Primenenie bazovoj systemy' mikroelementnykh normativov vremeni (BSM) v organizaczi' i normirovanii truda rabochikh: Metodicheskie rekomendaczi'. — M.: NII truda, 1985.
28. Primenenie E'VM dlya rascheta norm truda: Metodicheskie rekomendaczi'. Vy'p. 4. / pod red. A.S.Dovby', V.M. Ry'ssa i R.P. Miuskovoj // Metody' rascheta norm vremeni na potochnykh liniyakh sborki. — M.: NII truda, 1979.
29. Resursoberehenie v tyazhelom mashinostroenii. Reinzhiniring krupnogabaritnykh izdelij: monografiya /V.T. Lebed', A.A. Permyakov, A.N. Shelkovej. — Kramatorsk: DGMA, 2015. — 301 s.
30. Rotshtejn A.P. Proektirovanie bezdefektnykh cheloveko-mashinnykh tekhnologij. / Rotshtejn A.P., Kuznecov P.D. — K.: Tekhnika, 1992 — 180 s.
31. Salomatin N.A. Imitacziionnoe modelirovanie v operativnom upravlenii proizvodstvom. / N.A. Salomatin, G.V. Belyaev, V.F. Petrochenko, E.V. Proshlyakova. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 208 s.
32. Skry'pnik N. Avtomatizirovanny'e systemy' mikroelementnogo proektirovaniya i normirovaniya truda v razvity'kh kapitali-sticheskikh stranakh. / Skry'pnik N., Goryunov V. // Socz. Trud, 1986 — #4 — 112 — 117 s.
33. Solomenczev Yu.M. Situativnoe proektirovanie tekhnologicheskikh processov v gibkoj avtomatizirovanoj proizvodstvennoj sisteme. / Solomenczev Yu.M., Vasin A.M., Klimov S.V. — Vestnik mashinostroeniya, 1984 — #3 — 47 — 50 s.
34. Turko F.M. Metodika razrobotki vnedreniya mikroelementnykh normativov trudovykh processov. (Metodicheskie rekomendaczi'). / Turko F.M., Balushhak R.G., Mikhajlov Z.V. — K. 1992 r.
35. Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. Imitacziionnoe modelirovanie v zadachakh mekhanosborochnoho proizvodstva /Avtory': Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. □ Saarbrücken, Germany: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. 528 s.
36. Shelkovej A.N., Shron L.B., Ishhenko G.I., Ruzmetov A.R., Semchenko M.S. K voprosu o imitacziionno modelirovanii mashinno-ruchnykh tekhnologicheskikh operaczi'v v sistemakh obrabotki metallov rezaniem //Suchasni' tekhnologiyi v mashinobuduvanni': zb. nauk. pracz'. — Vip. 10, — Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. — C. 177 — 191.
37. Ergonomika. Problemy' prispobleniya uslovij truda k cheloveku: Sbornik statej. / Perv. s pol'sk. — M.: Mir, 1971 r. — 421 s.

*Поступила (received) 15.02.2022*

**Шелковой Александр Миколайович (Shelkovoу Alexander)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (050) 945-28-93; e-mail: [alnikshelk@gmail.com](mailto:alnikshelk@gmail.com), ORCID:0000-0002-7414-4854.

**Гасанов Магомедмін Ісамагомедовіч (Hasanov Magomedemin)** – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (096)-590-8850; e-mail: [kh.kajvika@gmail.com](mailto:kh.kajvika@gmail.com);

**Заковоротній Александр Юрійович (Zakovorotniy Alexander Yuryevich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальна техніка та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271;; e-mail: [arcade@i.ua](mailto:arcade@i.ua);

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

**Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii)** – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (099) 9512396, e-mail: [Valerii.Letiuk@mit.khpі.edu.ua](mailto:Valerii.Letiuk@mit.khpі.edu.ua)

**Феденюк Дмитро Віталійович (Fedeniuk Dmytro)** – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; e-mail: [fedeniuk@gmail.com](mailto:fedeniuk@gmail.com), tel: [+38\(066\)720-39-28](tel:+38(066)720-39-28),

6

**КЛИМЕНКО Г.П., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., ШАПОВАЛОВ М.В., ЩЕРБАКОВА А.Ю.**

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ

Оптимізація процесу різання має велике значення для металообробки в забезпеченні високої якості продукції та підвищенні її конкурентоспроможності. Ефективність лезової обробки металів різанням багато в чому визначається якістю різального інструменту. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується на призначенні оптимальних режимів різання. Визначено, що в якості критерію оптимальності виступає економічний: приведені витрати, собівартість та продуктивність. Враховуючи особливості різання на важких верстатах, сформовано цільовий функціонал приведених витрат і продуктивності. Враховуються обмеження конструкції верстата та інструмента, матеріали оброблюваних та інструментальних, період стійкості, а також обмеження, обумовлені якістю процесу експлуатації інструменту. Оптимізація режимів різання здійснюється одночасно за двома змінним – подачею  $S$  та швидкістю різання  $V$ . оптимальні режими різання повинні забезпечувати максимум середньої продуктивності або мінімум середньої собівартості. При використанні декількох критеріїв оптимальності оптимізація проводиться по кожному з них, а прийняття остаточного рішення відбувається шляхом порівняння отриманих значень. Середній фактичний період стійкості різального інструменту є величиною випадковою. Прийнято, що період стійкості твердосплавних інструментів на важких верстатах розподіляється за законом Вейбулла. Встановлено, що процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. У разі підвищених вимог до стабільності технологічного процесу обробки деталей при визначенні раціональних режимів різання враховується також надійність інструменту

**Ключові слова:** оптимізація, режими різання, важкий верстат, критерій оптимальності, приведені витрати, продуктивність

### KLYMENKO G.P., KOVALOV V.D., VASYLCHENKO YA.V., SHAPOVALOV M.V., SHERBAKOVA A. YU. OPTIMIZATION OF CUTTING MODES ON HEAVY MACHINES

The optimization of the cutting process is of great importance for metalworking in ensuring the high quality of products and increasing its competitiveness. Increasing the efficiency of metalworking is based on the designation of optimal cutting parameters. It is determined that the economic criterion is the criterion of optimality: discounted costs, prime cost and productivity. The objective functional of the discounted costs and productivity which considers feature of cutting on heavy machines is generated. The limitations of the design of the machine and tool, work material and tool material, tool life, as well as the limitations caused by the quality of the tool operation is taken into account. Optimization of cutting modes is carried out simultaneously by two variables - feed  $S$  and cutting speed  $V$ . Optimal cutting modes should provide the maximum average productivity and minimum average cost. If several optimality criteria are used, optimization is performed for each of them. The final decision is made by comparing the obtained values. The average actual tool life is a random value. It was accepted that the durability period of carbide tools on heavy machine tools was distributed according to the Weibull law. It is established that the cutting process is characterized by a large number of interrelated factors influencing both the course and the result of the process. With increased requirements to the stability of the technological process of machining of parts, in determining the rational cutting parameters, the tool reliability is also taken into account

**Keywords:** cutting parameters, heavy machine, optimality criterion, discounted costs, productivity.

**Вступ.** Широке впровадження нових конструкційних і інструментальних матеріалів, високопродуктивного обладнання з ЧПУ та адаптивних систем управління, передбачає застосування сучасного підходу до проектування технологічних систем. Вимоги, що пред'являються до вискоефективної металообробки, припускають раціональну експлуатацію дорогого устаткування, програмного забезпечення та ріжучого інструменту. У зв'язку з цим задачам оптимізації та управлінню процесом різання приділяється велика увага.

Оптимізація процесу різання має велике значення для металообробки в забезпеченні високої якості продукції та підвищенні її конкурентоспроможності.

**Аналіз стану питання.** Існуючі методи оптимізації можна поділити на дві широкі категорії: методи умовної оптимізації та методи безумовної оптимізації (рис. 1).

Процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується в призначенні оптимальних режимів різання. Як правило, метою оптимізації процесу різання є підвищення якості продукції при одночасному зниженні її вартості. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Для оптимізації процесу точіння автори з різних областей використовували різні підходи до вибору способу оптимізації, який включає в себе розробки математичних моделей та використання певного алгоритму, здатного оптимізувати ці моделі.

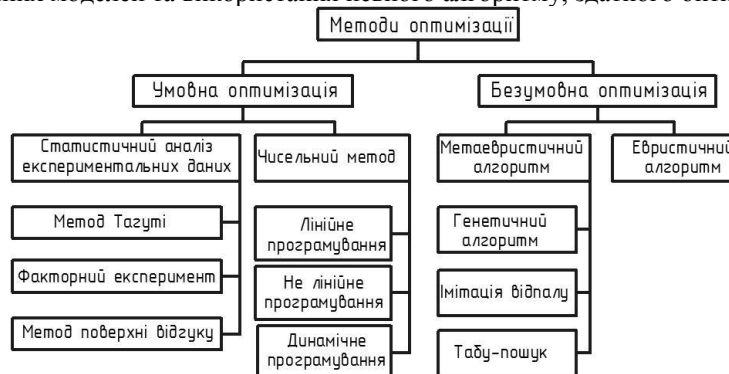


Рис. 1 – Класифікація методів оптимізації

Процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується в призначенні оптимальних режимів різання. Як правило, метою оптимізації процесу різання є підвищення якості продукції при одночасному зниженні її вартості. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Для оптимізації процесу точіння автори з різних областей використовували різні підходи до вибору способу оптимізації, який включає в себе розробки математичних моделей та використання певного алгоритму, здатного оптимізувати ці моделі.

В роботі [1] в якості критерію оптимальності прийнята мінімальна собівартість продукції. Швидкість різання, подача і глибина різання використовувались в якості системних змінних. Авторами розроблена математична модель з декілька змінними. В якості обмежень в заданих діапазонах використовувались: обмеження параметрів різання (швидкості різання  $V$ , подачі  $S$  та глибини різання  $d$ ), обмеження терміну служби інструменту ( $Tp$ ) і експлуатаційні обмеження (якості поверхні, сили різання та потужності). Операція попереднього точіння та чистового точіння мають свої власні обмеження, тому вони розглядаються окремо.

Мінімальна собівартість одиниці продукції, за винятком матеріальних витрат розраховувалась за формулою:

$$UC = CI + CM + CR + CT, \quad (1)$$

де  $CI$  – витрати за простій обладнання через операції завантаження та розвантаження (\$/шт.);

$CM$  – вартість обробки за фактичним часом різання (\$/шт.);

$CR$  – вартість заміни інструменту (\$/шт.);

$CT$  – вартість інструменту за рахунок заміни зношеного інструменту (\$/шт.).

Для оптимізації використовувався традиційний диференціальний метод і метод динамічного програмування.

В роботі [2] для забезпечення мінімальної собівартості виготовлення продукції при обробці заготовки з титанового сплаву використовувався «метод покоординатного спуску» для багатовимірних функцій. Розроблено математичні моделі та алгоритми оптимізації, що відображають взаємозв'язок параметрів режиму різання з такими критеріями якості, як продуктивність ( $\Pi$ ), собівартість ( $C$ ), ресурс ріжучого інструменту ( $T$ ) і шорсткість оброблюваної поверхні ( $Rz$ ). Вихідні дані, що включають в себе дані розрахунку критеріїв  $\Pi$ ,  $T$ ,  $C$ ,  $Rz$ , зображені у вигляді залежностей  $\Pi = f(V)$ ,  $T = f(V)$ ,  $C = f(V)$ ,  $Rz = f(V)$ . Допустимі значення початкових параметрів розглядаються як обмеження. Оптимізація виконується через варіації початкових параметрів у заданих обмежених діапазонах. Оптимальне рішення представляється з урахуванням коригованих значень параметрів, коли цільова функція приймає екстремальне значення  $F_{\min}$  (або  $F_{\max}$ ) для певного критерію ефективності.

Серед іноземних авторів розповсюджений пошук рішень для задач оптимізації багатопрохідної токарної обробки. Про це свідчить аналіз методів, проведений авторами [3]. В роботі сформульована модель основної сили різання з використанням методу поверхні відгуку, а також запропонована оптимізація параметрів обробки з використанням генетичного алгоритму для її мінімізації. Метод поверхні відгуку визнано успішною методикою для аналізу тенденції зміни сили різання відносно різних комбінацій розрахункових параметрів, включаючи швидкість різання ( $V_c$ ), подачу ( $S_0$ ) та глибину різання ( $t$ ). Це поєднання експериментального та регресійного аналізу, а також статистичних висновків. В даній роботі сила різання  $P_z$  представлена в якості функції від швидкості різання  $V_c$  та подачі  $S_0$ . Поверхня відгуку виражається як:

$$P_z = f(V_c, S_0, t) + e, \quad (2)$$

де  $e$  – це помилка, яка звичайно розподіляється з нульовим середнім відповідно до відгуку, який спостерігається.

Оптимальне значення параметрів різання вибрано таким чином, щоб звести до мінімуму основну силу різання, необхідну для токарної обробки, і, таким чином, знизити споживання енергії, знос інструменту, шуми і вібрацію, поліпшуючи чистоту поверхні.

В останнє десятиліття продовжують привертати увагу дослідників гібридні методи оптимізації завдяки їх здатності вирішувати складні комбінаторні задачі оптимізації. Дослідження [4] довели необхідність розробки надійного інструменту для пошуку найкращих параметрів обробки. В роботі розроблено алгоритм гібридного імітаційного відпалу для мінімізації собівартості виробництва при багатопрохідному точінні. Такий підхід заснований на поєднанні методу локального пошуку в алгоритмі імітації відпалу з глобальною оптимізацією генетичним алгоритмом, що дає можливість уникати локальних мінімумів та значно покращувати продуктивність. В якості математичної моделі використовувалась модель мінімізації вартості виготовлення одиниці продукції, запропонована в роботі [1]. В роботі враховуються обмеження, включаючи граничні параметри, та обмеження режимів різання на інструмент та заготовку. В роботі доведена ефективність даного гібридного методу оптимізації.

**Метою роботи** є підвищення ефективності металообробки на важких верстатах за рахунок призначення оптимальних режимів різання..

**Матеріали, обладнання та умови проведення досліджень.** Експериментальні дослідження базувалися на теоріях регресивного і кореляційного аналізів, математичної статистики з використанням методики форсованих, прискорених, тривалих іспитів, моментних спостережень, інформаційних банків, евристичних методів.

Експериментальні дослідження було проведено на верстатах з  $D_{\max} = 1250-2500$  мм із висотою різця від 40 до 80 мм. Дослідженню підлягали різальні пластини однієї партії з твердих сплавів, які рекомендовано для обробки на важких верстатах. Геометричні параметри різальної частини різців для всіх випробувань приймалися згідно з нормами заводу. Випробування проводилися при глибині різання 5–30 мм зі швидкістю різання приблизно відповідною 0,25–2,0 від економічної швидкості для даних умов. У межах однієї серії випробувань залишалися



незмінними верстат, заготовка, партія різців і партія твердосплавних пластин. Наприклад, одержані залежності стійкості на токарному верстаті мод. КЖ16274Ф3 модульними різцями висотою державки  $H = 45$  мм при обробці валків зі сталі 90ХФ, з режимами:  $t = 12$  мм,  $S = 1,6$  мм/об.,  $v = 52$  м/хв. Отримані результати статистично оброблялися.

**Результати досліджень.** Сучасний підхід до вирішення задачі вибору оптимальних умов різання ґрунтується на використанні методів математичного програмування. Відповідно до цього підходу постановка задачі оптимізації режимів різання полягає в тім, щоб за даними вимогами до виготовленої деталі та відомими параметрами системі ВПД необхідно знайти параметри процесу різання, що забезпечують екстремальне значення критерію оптимальності технологічного процесу. Математичне формулювання даної задачі може бути записано в такий спосіб [5]:

$$\begin{aligned} &extr W(\bar{X}); \\ &\bar{X} \in D; D = \{\bar{X}: f_i(\bar{X}) \leq b_i; i = \overline{1, n}\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$X = \begin{pmatrix} V \\ S \\ t \\ \gamma \end{pmatrix}; V > 0; S > 0; \gamma > 0;$$

де  $W(\bar{X})$  – критерій якості режиму різання (частина критерію оптимальності технологічного процесу, що залежить від умов різання);  $\bar{X}$  – параметри умов різання, що представляють собою  $n$ -мірний вектор з координатами;  $V$  – швидкість різання,  $S$  – подача,  $t$  – глибина різання;  $\gamma$  – передній кут.  $D$  – множина допустимих умов різання, що визначається обмеженнями, накладеними на елементи процесу різання у вигляді нерівностей  $f_i(\bar{X}) \leq b_i$ , де

$f_i(\bar{X})$  – деяка функція умов різання;  $b_i$  – відомі константи.

В якості цільової функції  $W(\bar{X})$  у математичній моделі (3) зазвичай використовують або економічні критерії або технологічні. Залежно від конкретної виробничої ситуації економічними критеріями оптимізації можуть бути: мінімальна технологічна собівартість, максимальна продуктивність оброблення та ресурс інструмента.

З метою автоматичного управління процесом механічної обробки на токарних верстатах з ЧПУ важливо забезпечити оптимальне значення швидкості різання. Математичні моделі для цього будуються з урахуванням заданих критеріїв оптимальності. В якості критерію оптимальності при призначенні режимів різання зазвичай беруть витрати часу на обробку однієї деталі (штучний час), або собівартість обробки однієї деталі. Таким чином, оптимальні режими різання повинні забезпечувати максимум середньої продуктивності або мінімум середньої собівартості.

Змінна частина технологічної собівартості  $C$ , що залежить від налагодження та режиму різання, при роботі одним інструментом визначається за формулою:

$$C = \tau_0 + \tau_{зм} \frac{\tau_0}{T} + 3_i \frac{\tau_0}{T} \quad , \quad (4)$$

де  $\tau_0$  – основний технологічний час (час, затрачений на безпосередню зміну геометричної форми і розмірів заготовки, що є ціллю даного переходу), хв.:

$$\tau_0 = \frac{l}{nS}$$

де  $l$  – розрахункова довжина робочого ходу у напрямку руху подачі, рівна сумі довжини  $l_3$  оброблюваної ділянки заготовки, шляху  $l_{ар}$  врізання головної ріжучої кромки інструмента у зрізаний шар і шляху  $l_n$  перебігу, необхідного для виходу інструмента із контакту з заготовкою.

$\tau_{зм}$  – час простою верстата у зв'язку із заміною інструмента;

$3_i$  – витрати, пов'язані з експлуатацією інструмента за період його стійкості:

$$3_i = \tau_{зм} E_H + C_{зат} + \frac{(C_{п} - C_{відх}) K_B}{j+1},$$

де  $E_H$  – номінальна заробітна плата наладчика за хвилину;  $C_{зат}$  – вартість загострення інструмента, що затупився;  $C_{п}$  – початкова вартість інструмента;  $C_{відх}$  – вартість відходів інструмента;  $K_B$  – коефіцієнт, що враховує випадкову втрату інструмента;  $j$  – число переточувань, що допускається інструментом до його повної амортизації.

Продуктивність оброблення  $\Pi$  визначають через штучний час  $\tau_{шт}$ :

$$\Pi = \frac{1}{\tau_{шт}} \quad (5)$$

$$\tau_{шт} = \tau_0 + \tau_{зм} \frac{\tau_0}{T} + \sum \tau, \quad (6)$$

де  $\sum \tau = \tau_{доп} + \tau_{об} + \tau_в$ ;  $\tau_{доп}$  – допоміжний час, затрачений на встановлення заготовки на верстаті, зняття її або готової деталі з верстата, пуск і зупинка верстата і т.п.;  $\tau_{об}$  – час організаційного та технічного обслуговування робочого місця;  $\tau_в$  – час перерв та відпочинку.

Відома стійкісна залежність, що враховує знос ріжучого інструменту:

$$T = \frac{C_{TV} V^k}{e^{k_1 V S^q}}$$

На рис.2 представлена залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі при роботі твердосплавним інструментом.

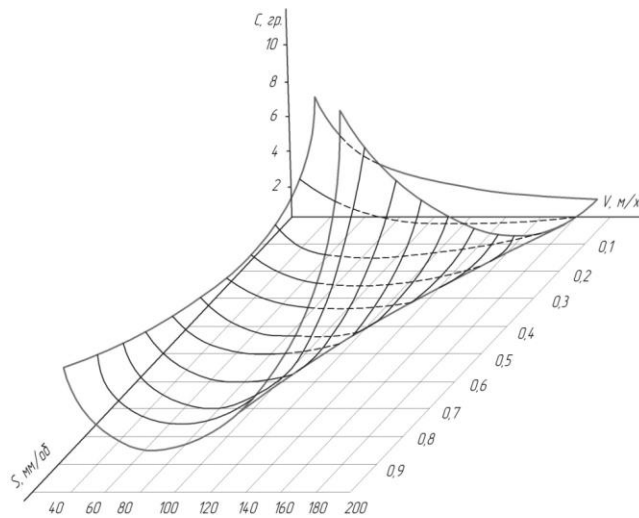


Рис. 2 – Залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі

Статистичні дослідження показали, що 45% ріжучого інструменту (PI) при роботі на важких верстатах виходить із ладу в результаті поломок. Тому необхідно враховувати ймовірність руйнування та рівень надійності PI. Для цього в роботі [6] визначено цільові функції та стійкісну залежність інструменту з урахуванням цих параметрів. При цьому прийнято, що період стійкості твердосплавних інструментів на важких верстатах розподілявся по закону Вейбулла з параметрами  $a$  та  $b$ , а в якості економічного критерію оптимальності приймаються приведені витрати, які залежать не тільки від традиційних параметрів, а також від ймовірності руйнування інструменту  $q$ , від кількості періодів стійкості інструмента  $K$  та від рівня надійності  $\gamma$  PI.

При формуванні цільової функції враховувались лише ті витрати, які залежать від режиму обробки. Цільова функція, що виражає приведені витрати на знімання одиниці об'єму металу з заготовки за період стійкості інструменту приймає вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{V \cdot S} \left( E + \frac{\tau_3 E}{T(V, S, t, q, \gamma)} + \frac{A_{ин}}{K(q, S) \cdot T(V, S, t, q, \gamma)} \right), \quad (8)$$

де  $E$  - приведені витрати без урахування вартості інструмента, що припадають на одну хвилину роботи верстата, коп. / ст.-хв;

$$E = \bar{E} + \varepsilon K, \quad (9)$$

де  $\bar{E}$  - середня собівартість верстатогодиниці (без вартості ріжучого інструменту) коп/ст-хв;

$\varepsilon$ -галузевий нормативний коефіцієнт економічної ефективності  $\varepsilon = 0,12$ ;

$K$  – питомі додаткові витрати, зумовлені капітальними вкладеннями,

$\tau_3$  – час простою верстата, пов'язаний із заміною інструменту;

$A_{ин}$  – приведені витрати, обумовлені експлуатацією інструменту, грн.;

$T(V, S, t, q_p, \gamma)$  – середній період стійкості різального інструменту з урахуванням його зношування та руйнування й розсіювання властивостей;

$$T = \frac{C_v^{y_v} (0.108 q_p^{0.68} D_c^{0.15} - q_p + 1) \cdot \eta}{v^{y_v} \cdot S^{y_s} \cdot t^{y_t}}, \quad (10)$$

де  $V, S, t$  – складові режиму різання (швидкість різання, подача та глибина відповідно);

$m_v, x_v, y_v$  – показники ступеня стійкісної залежності;

$q_p$  – ймовірність руйнування інструменту;

$K(q, S)$  – число періодів стійкості інструменту з урахуванням ймовірності його руйнування: для переточуваних пластин  $K=1/q$ ; для багатограних непереточуваних пластин з числом граней  $Z$ :  $K=Z(1-q)$ ;

$\eta$  - поправочний коефіцієнт на період стійкості, що враховує його розсіювання.

В даному випадку оптимізація режимів різання здійснюється одночасно за двома змінним – подачею  $S$  та швидкістю різання  $V$ . При використанні декількох критеріїв оптимальності оптимізація проводиться по кожному з них, а прийняття остаточного рішення відбувається шляхом порівняння отриманих значень.

Середній фактичний період стійкості  $PI$  є величиною випадковою. Він залежить від ймовірності появи відмови відповідного виду (знос або руйнування)[7]. Середній період стійкості  $PI$ , який залежить від його зносостійкості та міцності визначається за формулою:

$$T = q_z \cdot T_z + q_p \cdot T_p = T_z \cdot x, \tag{11}$$

де  $T_z$  та  $T_p$  – середні періоди стійкості, обумовлені відповідно зносом і руйнуванням інструменту;  $q_z$  та  $q_p$  – ймовірності появи відмови відповідно зносу і руйнування ( $q_z + q_p = 1$ , враховуючи, що сума ймовірностей зносу і руйнування дорівнює одиниці);  $x$  – коефіцієнт, що враховує зміну періоду стійкості у зв'язку з руйнуванням інструменту.

При статистичних дослідженнях стійкості  $PI$  встановлено, що при ручному управлінні важкими верстатами робочий корегує період стійкості (режими різання) з урахуванням ергономічних факторів, пов'язаних з навантаженнями на робочого. Зі збільшенням розмірів верстата економічна стійкість падає, так як зменшується відношення витрат на інструмент до витрат на верстат і його експлуатацію. Разом з цим при точінні великогабаритних деталей на важких верстатах при  $D_c > 1600$  мм спостерігається збільшення фактичної стійкості  $PI$ . Це обумовлено наступними особливостями: заміна інструменту проводиться з супортного майданчика; збільшується маса інструменту в зв'язку зі збільшенням його розмірів; погіршується можливість спостереження за зоною різання через великі габарити оброблюваних деталей. Перераховані особливості призводять до істотного фізичного і психічного навантаження на верстатника, що, в свою чергу, впливає на зниження середнього часу відновлення процесу різання. На рис.3 наглядно показано зміну періоду стійкості.

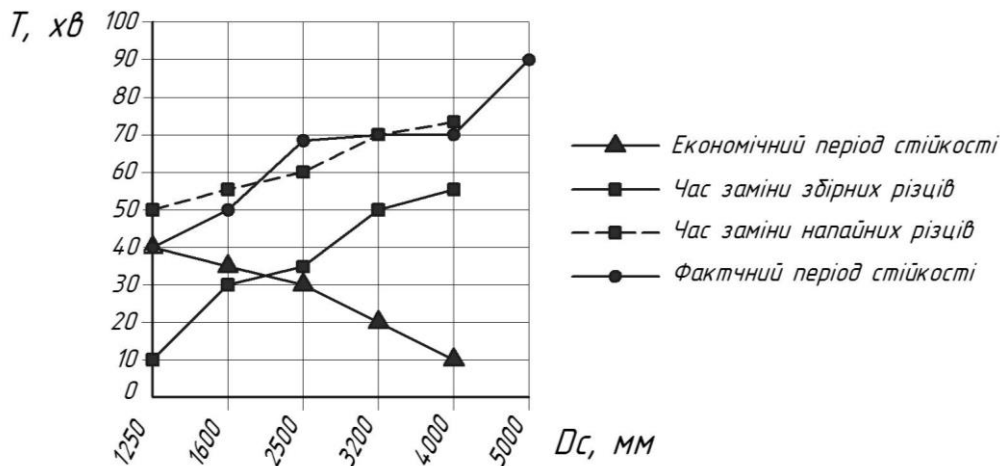


Рис. 3 – Періоди стійкості різців та час їх заміни

З урахуванням рівня надійності  $\gamma$   $PI$ , а також ймовірності його руйнування  $q$ , цільові функції приймають вигляд:

$$\Pi = \frac{E}{S \cdot V} + \frac{\frac{\gamma}{100} \tau_{з.п.} a_{нас.} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \tau_{з.а.} (E_1 + a_{нас.})}{T_\gamma S \cdot V} + \frac{\frac{\gamma}{100} \cdot \frac{A_{ин}}{K_1} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \cdot \frac{A_{ин}}{K_2}}{\omega T_\gamma S \cdot V}, \tag{12}$$

де  $E$  і  $E_1$  – відповідно вартість хвилини роботи і простою верстата, коп-хв;

$V, S$  – відповідно швидкість різання, м/хв., подача, мм/об;

$\tau_{з.п.}, \tau_{з.а.}$  – час відповідно профілактичної та аварійної заміни інструментів, хв;

$a_{нас.}$  – вартість однієї хвилини часу заміни та настройки інструменту, коп-хв;

$A_{ин}$  – вартість інструменту, коп;

$K_1, K_2$  – число періодів стійкості інструменту відповідно при його профілактичній та аварійній заміні: для різців з механічним кріпленням пластин

$$K_1 = Z, K_2 = Z(1 - q_p),$$

де  $Z$  – кількість граней пластини,  $q_p$  – ймовірність руйнувань граней пластини  $P$ , пов'язаних з подачею;

$\omega$  – коефіцієнт, що враховує зменшення  $T_\gamma$  при аварійній заміні інструменту (ймовірність аварійного відмови):

$$\omega = 1 - \frac{T_{(\gamma)}^b}{a^b(b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{2b}}{a^{2b}(2b+1)} \frac{T_{(\gamma)}^{3b}}{a^{3b}(3b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{4b}}{a^{4b}(4b+1)}$$

Період стійкості, що відповідає певному рівню надійності інструменту  $\gamma$  (гамма відсотку):

$$T_{\gamma} = T\eta = a \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b},$$

де  $\eta$  – поправочний коефіцієнт на період стійкості PI, що враховує рівень надійності:

$$\eta = \frac{\left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b}}{K_b}$$

**Висновки.** Аналіз вітчизняної та закордонної літератури дозволив виявити найбільш використовувані критерії оптимальності режимів різання – економічні: приведені витрати, собівартість, продуктивність (їх змінні частини, які залежать від режимів різання). Враховуючи особливості різання на важких верстатах, сформовано цільовий функціонал приведених витрат і продуктивності. Включення до цільових функцій зв'язків стійкості та числа періодів стійкості, обумовлених міцністю інструменту, з елементами режиму різання, дозволило отримати екстремум цільового функціоналу переважно в області режимів різання, вільній від обмежень, що спрощує завдання визначення раціональних регламентів експлуатації. При визначенні раціональних елементів режимів різання при чорновому точінні на важких токарних верстатах враховуються обмеження конструкції верстата та інструмента, матеріали оброблюваний та інструментальний, період стійкості, а також обмеження, обумовлені якістю процесу експлуатації інструменту. У разі підвищених вимог до стабільності технологічного процесу обробки деталей при визначенні раціональних режимів різання враховується надійність інструменту.

#### Список літератури

1. Y. C. Shin and Y. S. Joo Optimization of machining conditions with practical constraints / International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 12, pp. 2907–2919, 1992.
2. M Bogoljubova, A Afonarov, V Kozlov and O. Sumtsova Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012045 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012045.
3. Bhuiyan, T. and Ahmed, I. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process / SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):2014, doi : 10.4271/2014-01-9097.
4. Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, and Ahmed El Khalfi Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm / Hindawi Modeling and Simulation in Engineering Volume 2017, Article ID 1940635, 10 pages.
5. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів : Новий Світ–2000, 2010. – 422 с.
6. Клименко Г.П. Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента : Учеб. пособие. – Краматорск: ДГМА, 2006. – 200 с.
7. Клименко Г. П. Определение рациональных регламентов эксплуатации инструментов для тяжелых станков с ЧПУ / Г. П. Клименко, Я. В. Васильченко, А. Н. Лышенко // Резание и инструмент в технологических системах = Cutting & tool in technological system : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2016. – Вып. 86. – С. 49-56.

#### References (transliterated)

1. Y. C. Shin and Y. S. Joo Optimization of machining conditions with practical constraints / International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 12, pp. 2907–2919, 1992.
2. M Bogoljubova, A Afonarov, V Kozlov and O. Sumtsova Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012045 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012045.
3. Bhuiyan, T. and Ahmed, I. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process / SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):2014, doi : 10.4271/2014-01-9097.
4. Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, and Ahmed El Khalfi Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm / Hindawi Modeling and Simulation in Engineering Volume 2017, Article ID 1940635, 10 pages.
5. Mazur M.P. Osnovy teoriiy rizannya materialiv: pidruchnyk [dlya vyshch. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, YU.M. Vnukov, V.L. Dobroskok, V.O. Zaloha, YU.K. Novos'olov, F.YA. Yakubov ; pid zah. red. M.P. Mazura. – L'viv : Novyy Svit–2000, 2010. – 422 s.
6. Klimenko G.P. Osnovy ratsional'noy ekspluatatsii rezhushchego instrumenta : Ucheb. posobiye. – Kramatorsk: DGMA, 2006. – 200 s.
7. Klimenko G. P. Opredeleniye ratsional'nykh reglamentov ekspluatatsii instrumentov dlya tyazhelykh stankov s CHPU / G. P. Klimenko, YA. V. Vasil'chenko, A. N. Lishenko // Rezaniiye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh = Cutting & tool in technological system : mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – Khar'kov : NTU "KHPI", 2016. – Vyp. 86. – S. 49-56.

Поступила (received) 03.04.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Клименко Галина Петрівна (Klymenko Galyna Petrivna)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1022-6324>; e-mail: [galynaklymenko1@gmail.com](mailto:galynaklymenko1@gmail.com)

**Ковальов Віктор Дмитрович (Kovalev Viktor Dmytrovych)** – доктор технічних наук, професор, ректор Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5091-5856>, e-mail: [kovalov.viktor@gmail.com](mailto:kovalov.viktor@gmail.com)

**Васильченко Яна Василівна (Vasylichenko Yana Vasylivna)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-8827>, e-mail: [wasylichenko.ua@gmail.com](mailto:wasylichenko.ua@gmail.com)

**Шаповалов Максим Валерійович (Shapovalov Maksym Valeriyovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-8834>, e-mail: [harleymax1979@gmail.com](mailto:harleymax1979@gmail.com)

**Шербаківа Анастасія Юрївна (Sherbakova Anastasiya Yuriyivna)** – аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: , e-mail: [shebakova.anastasiya1989@gmail.com](mailto:shebakova.anastasiya1989@gmail.com)

*СТЕПАНОВ М.С., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА Л.П., ІВАНОВА М.С.*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ РОБОЧОЇ РІДИНИ В ПІДШИПНИКАХ ШПИНДЕЛЯ КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ НА ПОХИБКУ ЙОГО ПОЛОЖЕННЯ ВІДНОСНО ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕТАЛІ**

У статті наведено результати вимірювань температури навколишнього середовища працюючих круглошліфувальних верстатів протягом робочого дня. Виконано аналіз поведінки шпинделя шліфувальної бабки різних круглошліфувальних верстатів протягом робочої зміни, а саме представлено результати експериментальних досліджень зміщення переднього і заднього кінців шпинделя шліфувальної бабки круглошліфувальних верстатів. Проведено аналіз впливу температури масла в підшипниках шпинделя на величину його зміщення. Встановлено можливі зміни геометричної форми, а саме конусності, деталей, оброблюваних на круглошліфувальних верстатах.

**Ключові слова:** круглошліфувальний верстат, передній і задній підшипники шліфувальної бабки, температура робочої рідини, зміщення шпинделя.

**STEPANOV M.S., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA L.P., IVANOVA M.S.**

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF THE WORKING LIQUID TEMPERATURE IN THE SPINDLE BEARINGS OF A CYLINDRICAL GRINDING MACHINE ON THE ERRORS OF ITS POSITION RELATIVE TO THE PART BEING MACHINED**

The article presents the results of measurements of the ambient temperature around the working cylindrical grinding machines during the working day. The analysis of the behavior of the grinding head spindle of different cylindrical grinding machines during the work shift is performed, namely the results of experimental studies of the displacement of the front and rear ends of the grinding head spindle of cylindrical grinding machines are presented. The analysis of influence of temperature of working fluids in spindle bearings on its displacement is carried out. Possible changes in the geometric shape, namely, conicity, of parts machined on cylindrical grinding machines have been established.

**Keywords:** cylindrical grinding machine, front and rear grinder bearings, working fluid temperature, spindle displacement.

**1. Вступ.** Під час роботи круглошліфувального верстата внаслідок впливу температурних деформацій змінюється взаємне положення його деталей і вузлів, у тому числі й шліфувальної бабки, що в свою чергу спричиняє появу похибок форми оброблюваних деталей. Одним з головних чинників, що спричиняють похибки форми оброблюваної деталі, є перекіс шпинделя шліфувальної бабки верстата внаслідок нерівномірного нагріву підшипників шпинделя, розташованих у стінках шліфувальної бабки [1-4]. Знання характеру зміни теплового стану робочої рідини в підшипниках шпинделя шліфувальної бабки та його вплив на зміщення положення шпинделя у підшипниках протягом робочої зміни може сприяти пошуку ефективних заходів по зменшенню впливу вказаних факторів на похибки форми оброблюваної деталі.

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** З розвитком технології обробки різанням, створенням нових матеріалів для різальних інструментів, вдосконаленням конструкцій металорізальних верстатів велика кількість дослідників пропонують не враховувати температурні деформації заготовок і інструментів [5].

На перший план виходить врахування температурних деформацій шпиндельних вузлів і пов'язаних з ними елементів верстатів. Тепловий вплив на шпиндельний вузол визиває ті ж самі наслідки, що й силова дія: деформацію деталей технологічної системи верстата.

Одним з етапів при аналізі теплових явищ у шліфувальних верстатах є експериментальне визначення температурних деформацій і визначення їх впливу на точність взаємного розташування шліфувального круга і заготовки.

За даними [6] зміщення шпинделя в різних площинах може складати від декількох сотих міліметра. Крім того, експериментальні дані фірм виробників верстатів показують, що температурні зміщення у сучасних прецизійних верстатах можуть перевищувати 100 мкм [7].

**3. Мета дослідження.** Експериментальне визначення змін у положенні шпинделя шліфувальної бабки круглошліфувальних верстатів внаслідок нагріву робочих рідин в підшипниках шпинделя протягом робочої зміни.

### **4. Викладення основного матеріалу.**

З метою визначення впливу температури робочої рідини у підшипниках шпинделя шліфувальної бабки на величину його зміщення проведено експериментальні дослідження групи круглошліфувальних верстатів, базові деталі і вузли яких ідентичні аналогічним деталям і вузлам верстатів 3М152В, 3М162В, 3М152ВФ20 та іншим.

Температурні умови при проведенні експериментів були наступні. Температура в цеху протягом робочої зміни змінювалася на величину 2-3°C (рис. 1). У більшості досліджуваних верстатів (№1, №4, №5, №6, №7, №8, №9, №10) температурні умови були однакові – температура складала 18-22 °С, тільки у одному верстаті (верстат №2) температура складала 12-14 °С.

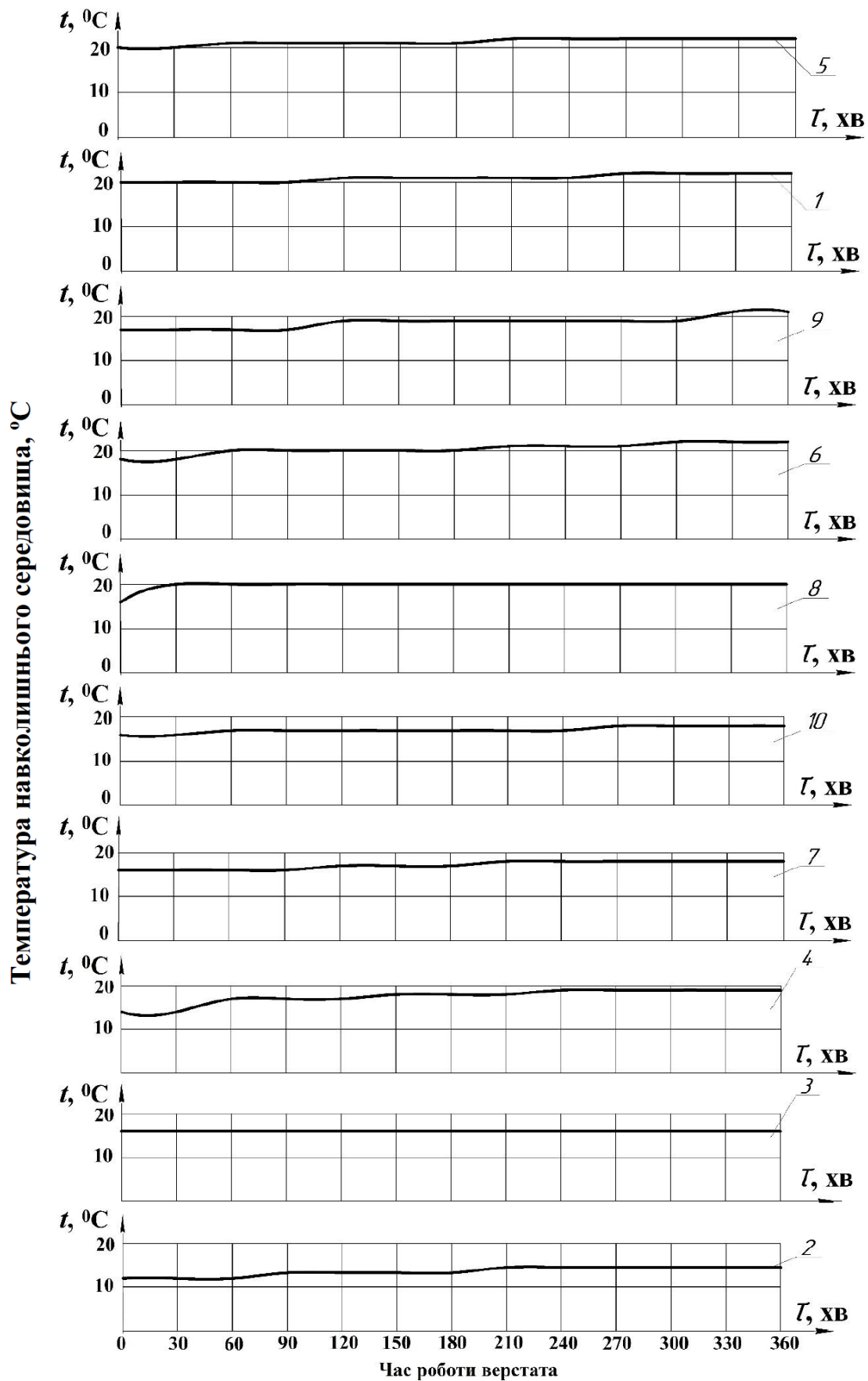


Рис. 1 – Характер зміни температури навколишнього середовища протягом робочого дня для верстату 3М151Ж 1...10 – порядкові номери верстатів

При аналізі поведінки шпинделя шліфувальної бабаки встановлено, що у 8 з 10 досліджуваних верстатів,



передній кінець шпинделя зміщується у бік заготовки (рис.2).

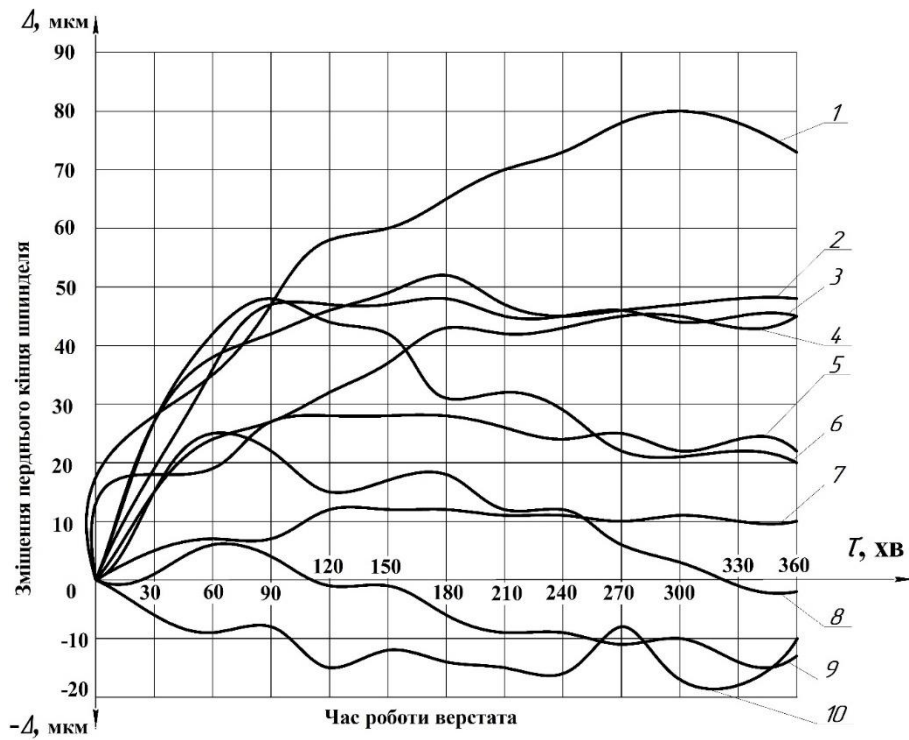


Рис. 2 – Зміщення переднього кінця шпинделя шліфувальної бабки верстатів 3A151 протягом робочого дня: 1...10 – порядкові номери верстатів

Тенденція зміщення переднього кінця шпинделя в бік заготовки спостерігається практично протягом 6 годин роботи верстатів.

У одному з двох верстатів, що залишилися (№9), передній кінець шпинделя в перші дві години роботи також переміщується у бік заготовки. Величина зміщення складала від 5 мкм (період роботи 30 хвилин) до 78...83 мкм (період роботи 330 хвилин). Середня величина зміщення шпинделя складала: 21,4 мкм через 60 хв роботи верстата; 36,5 мкм через 180 хв роботи верстата; 33 мкм через 360 хв роботи верстата.

Поведінка заднього кінця шпинделя сильно відрізнялася від поведінки переднього (рис. 3).

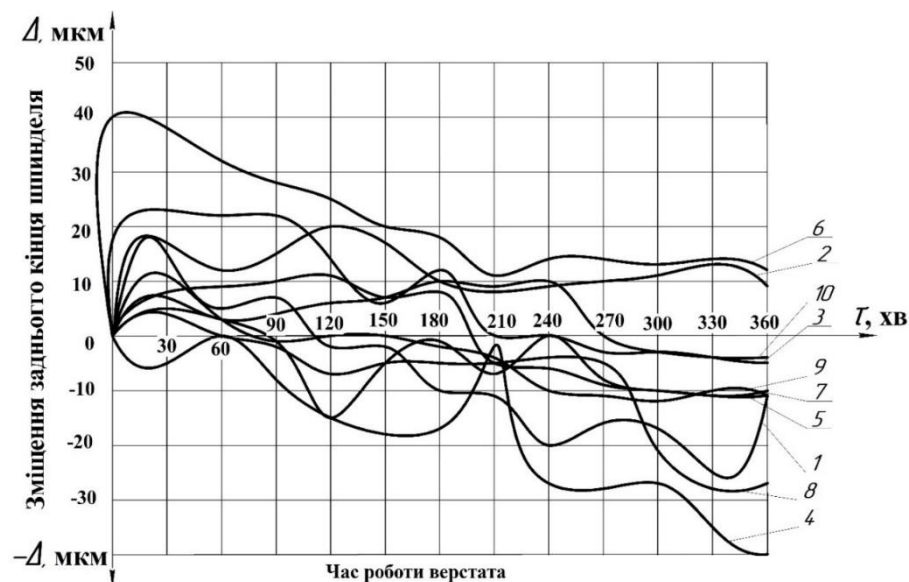


Рис. 3 – Зміщення заднього кінця шпинделя шліфувальної бабки верстатів 3A151 протягом робочого дня: 1...10 – порядкові номери верстатів

Очевидно, що для більшості верстатів задній кінець шпинделя при збільшенні часу роботи зміщувався від заготовки (верстати №1, №4, №5, №7, №8, №9). Для інших верстатів зміщення хоча й було спрямоване в бік заготовки, але зі збільшенням часу роботи значно зменшувалося (верстати №2 і №6), або й зовсім змінювало напрямок

(верстати №3 і №10).

Як показали дослідження, температура масла в підшипниках значною мірою впливає на величину зміщення шпинделя. Для оцінки цього впливу вводили параметр

$$f_{\Delta l/\Delta t} = \frac{\Delta l_{\text{шп}}}{\Delta t_{\text{ррп}}},$$

де  $\Delta l_{\text{шп}}$  – величина зміщення шпинделя, мкм;  $\Delta t_{\text{ррп}}$  – прирощення температури робочої рідини в підшипниках шпинделя, °С.

Для переднього кінця шпинделя

Для заднього кінця шпинделя

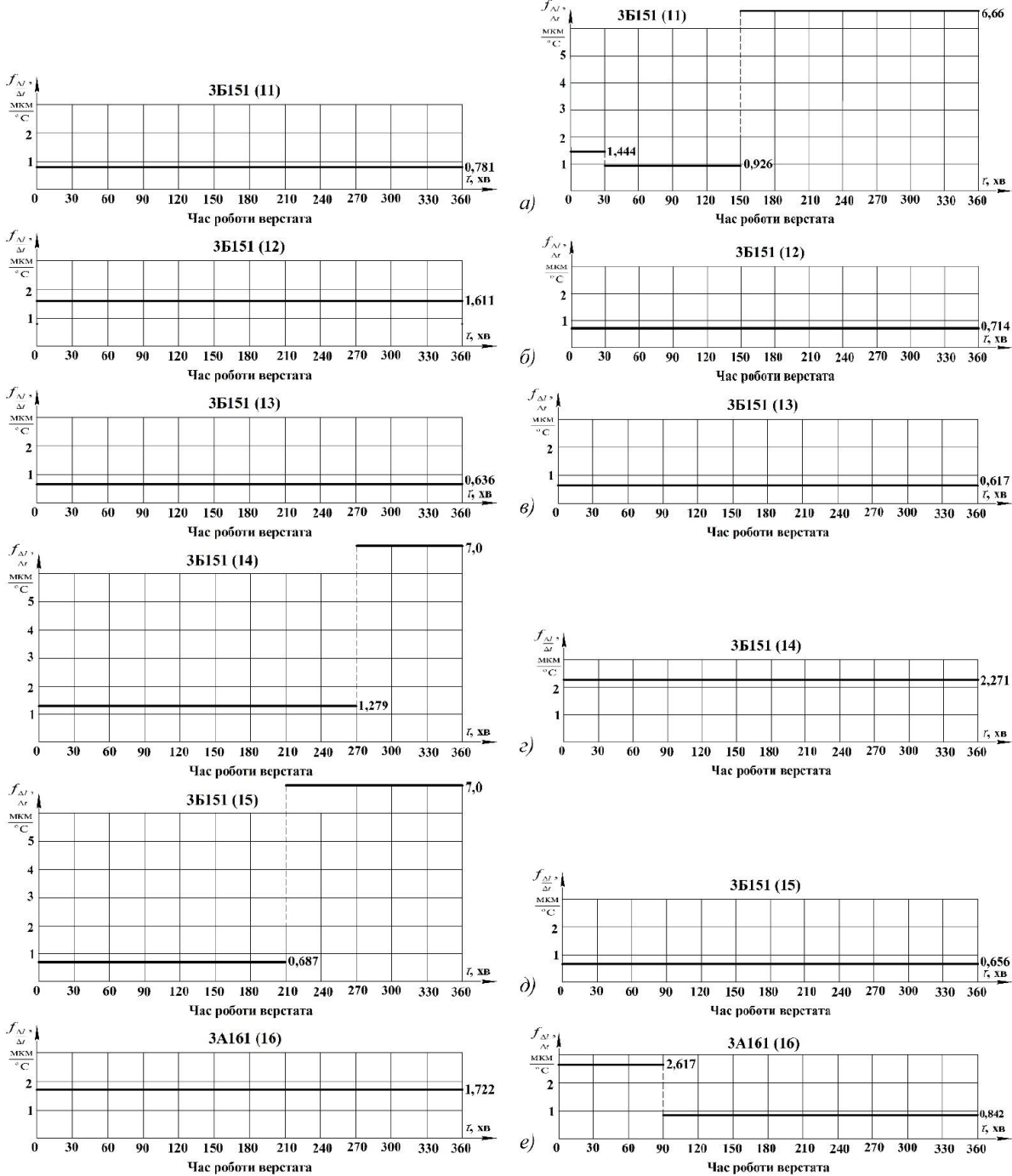
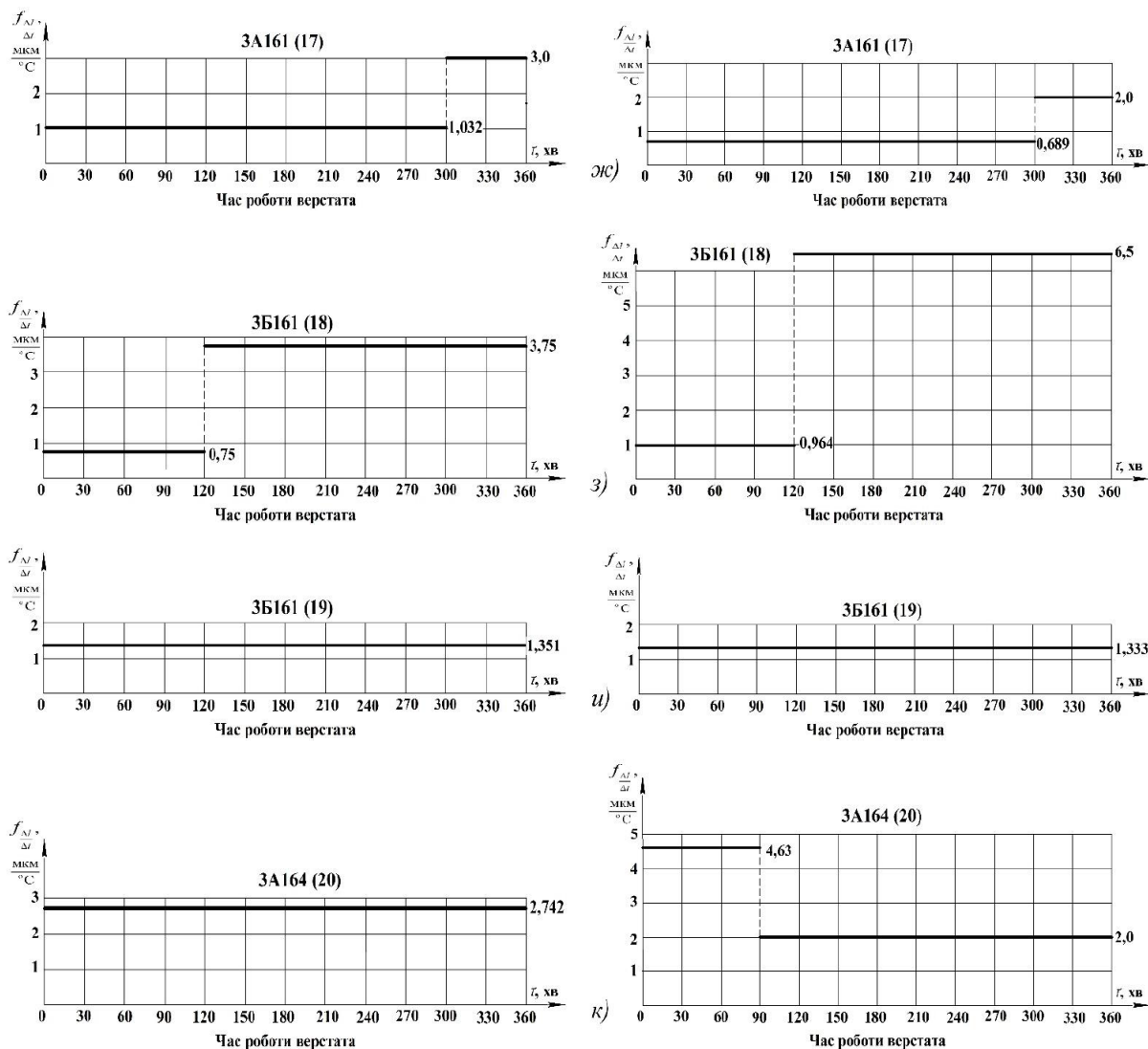


Рис. 4 – Зміна параметра  $f_{\Delta l/\Delta t}$  протягом робочого дня





Закінчення рис. 4

Параметр  $f_{\Delta l / \Delta t}$  показує на скільки мікрметрів зміщується задній або передній кінець шпинделя при нагріванні робочої рідини в його підшипниках на  $1^\circ\text{C}$ .

При дослідженні роботи 10 верстатів моделей 3B151, 3A161, 3B161 і 3A161 було визначено параметр  $f_{\Delta l / \Delta t}$  для зміщення переднього і заднього кінців шпинделя шліфувальної бабки.

Як видно з діаграми на рис. 4, максимальна величина зміщення переднього кінця шпинделя 7 мкм при нагріванні робочої рідини у підшипниках на  $1^\circ\text{C}$ , що нетипово, і є, скоріш за все, виключенням з правил.

В середньому, при нагріванні робочої рідини на  $1^\circ\text{C}$  шпиндель зміщується в межах  $1 \dots 2,5$  мкм. При цьому, якщо для переднього кінця шпинделя величина  $f_{\Delta l / \Delta t}$  складає  $2,109 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$ , то для заднього кінця шпинделя ця величина складає  $1,922 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$ .

У половині випадків (для переднього кінця шпинделя в 6 з 10 випадків, для заднього – в 5 з 10) можна вважати, що  $f_{\Delta l / \Delta t}$  протягом робочого дня змінюється мало. В інших випадках зміщення значне, причому  $f_{\Delta l / \Delta t}$  значно збільшується, в основному, під кінець робочої зміни.

В той же час, під час досліджень спостерігались такі випадки, коли поведінка шпинделів носила інший характер, а саме – зміщення кінця шпинделя не відповідало рівню температури робочих рідин у підшипниках. Наприклад, у одного з верстатів 3A164 величина зміщення переднього кінця складало 115 мкм, а заднього – 30 мкм, при тому, що температура робочої рідини у підшипниках змінювалася в межах  $10 \dots 40^\circ\text{C}$ , а в задньому – в межах  $18 \dots 38^\circ\text{C}$ .

Отже, величина температурних деформацій може не залежати в такій степені від температури робочих рідин у підшипниках, як може показатися на перший погляд при аналізі результатів експериментів. У зв'язку з цим, слід спрямовувати дослідження на пошук інших причин, що здійснюють вплив на температурні зміщення деталей і вузлів верстата.

В результаті дії температурних факторів, а отже, нерівномірного зміщення кінців шпинделя на поверхні прошліфованих деталей виникають погрішності (відхилення від заданої геометричної форми), які проявляються у вигляді конусності у деталей, оброблених методом врізного шліфування.

Як видно з графіків (рис. 5), конусність протягом робочої зміни може змінюватися в широких межах, аж до

виникнення зворотного конуса (у діапазоні від 0 до 30 хвилин роботи верстата), що ілюструє графік (верстат №6).

Максимальна величина конусності  $(71-210) \cdot 10^{-6}$  мм мала місце в кінці робочого дня, а мінімальна –  $22 \cdot 10^{-6}$  мм – в перші 30 хвили роботи верстата.

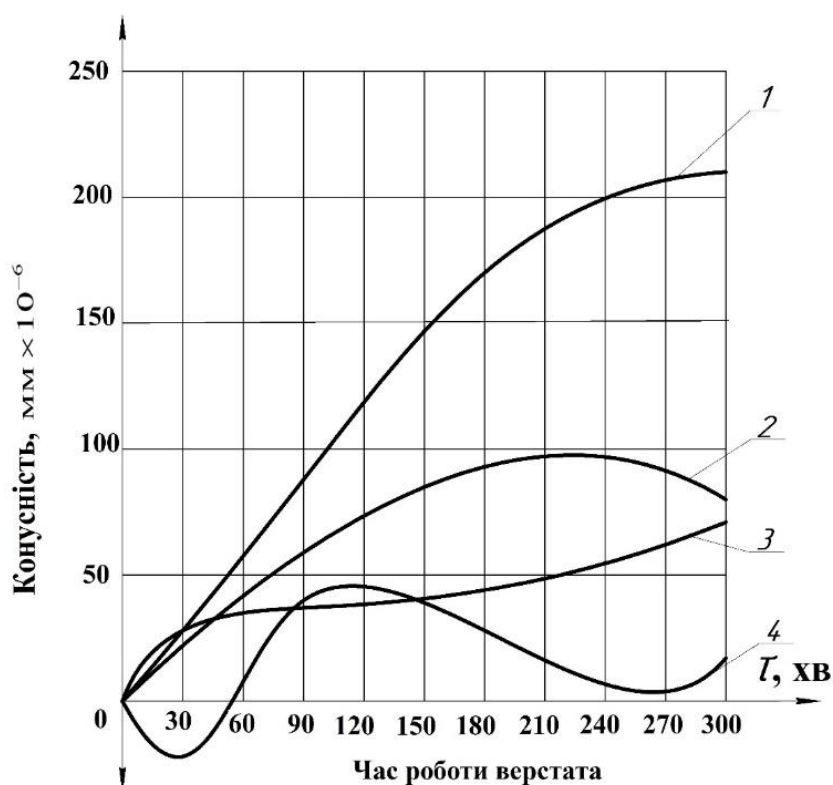


Рис. 5 – Можливе зміння конусності шліфованих деталей на верстатах 3A151: 1, 2, 3, 4 верстати відповідають верстатам №1, №2, №5, №6, що прийняті раніш (див. рис. 2)

#### Висновки.

1. Наведені результати експериментальних досліджень дали можливість визначити положення шпинделя шліфувальної бабки, яке змінюється при роботі верстата протягом робочої зміни.

2. Величина і напрямок зміщення шпинделя визначається температурою робочої рідини в його підшипниках. При нагріванні робочої рідини на  $1^{\circ}\text{C}$  задній або передній кінець шпинделя зміщується в межах  $1 \dots 2,5$  мкм.

3. Внаслідок зміни протягом робочого дня температурних умов роботи верстата і температури робочої рідини у підшипниках змінюється величина конусності, що виникає на поверхні шліфованих деталей.

4. Приведені результати необхідно розглядати не як остаточні, а як проміжні результати, оскільки вони не враховують ряд факторів, серед яких, наприклад, циклічність роботи верстата і значний вплив стану і якості МОР.

#### Список літератури:

16. Степанов М.С., Літовченко П.І., Іванова Л.П., Іванова М.С. Експериментальні дослідження температури робочої рідини в підшипниках шпинделя круглошліфувальних верстатів // 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. 27–32.
17. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Tarasenko, O. Study of Thermal Modes of Working Fluids in Grinding Machines. In: , et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2020. – P. 299–308.
18. Іванова Л.П. Аналіз теплового стану технологічних рідин металорізальних верстатів / Л.П. Іванова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Серія: Технології в машинобудуванні, №1. – 2020. – С. 36-40.
19. Рохин В.Л. Исследование баланса тепловых деформаций токарного станка с ЧПУ / В.Л. Рохин, Л.В. Рохин // Вестник КГУ. – 2005. – №2. – С. 106-108.
20. Гончаров А.Н. Компенсация температурной погрешности станков с ЧПУ на основе коррекции управления движением их рабочих органов: дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» / А.Н. Гончаров. – «Оренбургский государственный университет», 2018. – 230 с.
21. Якимов О.В., Усов А.В., Слободяник П.Т., Горгачов Д.В. Теплофізика механічної обробки / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д.В. Горгачов. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.
22. Поляков А.Н., Марусич К.В. Управление термодформационным состоянием станка на основе автоматизации прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов: учеб. пособие. – Оренбургский государственный университет, 2012. – 220 с.

#### References (transliterated)

16. Stepanov M.S., Litovchenko P.I., Ivanova L.P., Ivanova M.S. *Eksperymentalni doslidzhennia temperatury robochoi ridyny v pidshypanykakh shpyndelia kruhloshlifovalnykh verstativ* [Experimental studies of working fluid temperature in spindle bearings of cylindrical grinding machines] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: 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. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5) 2022. – S.

17. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Tarasenko, O. Study of Thermal Modes of Working Fluids in Grinding Machines. In: , et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 299–308. (2020).
18. Ivanova L.P. *Analiz teplovoho stanu tekhnologichnykh ridyn metalorizalnykh verstativ* [Analysis of the thermal state of technological fluids of metal-cutting machines] / *Visnyk NTU "KHPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni*. №1. 36-40 (2020).
19. Rohin V.L., Rohin L.V. *Issledovanie balansa teplovykh deformacij tokarnogo stanka s ChPU* [Investigation of the balance of thermal deformations of a CNC lathe]. / *Vestnik KGU*. №2. 106-108 (2005).
20. Honcharov A.N. *Kompensatsiya temperaturnoi pohreshnosti stankov s ChPU na osnove korrektsyy upravleniya dvyzhenyem ykh rabochoykh orhanov* [Compensation of the temperature error of CNC machine tools based on the correction of the motion control of their working bodies]: dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.06 «Avtomatyzatsiya y upravlenye tekhnolohycheskymy protsessamy y proyzvodstvamy» / A.N. Honcharov. – «Orenburshkiy gosudarstvennyi unyversytet», 2018. – 230 s.
21. Iakymov O.V., Usov A.V., Slobodianyuk P.T., Horhachov D.V. *Teplofizyka mekhanichnoi obrobky* [Thermophysics of mechanical processing] / O.V. Yakymov, A.V. Usov, P.T. Slobodianyuk, D.V. Horhachov. – Odessa: Astroprint, 2000. – 256 s.
22. Poliakov A.N., Marusych K.V. *Upravlenye termodeformatsionnym sostoianiem stanka na osnove avtomatyzatsyy prohnozyrovaniya temperaturnykh peremeshcheniy yspolnytelnykh orhanov: ucheb. Posobyie* [Control of the thermal deformation state of the machine tool based on the automation of forecasting the temperature movements of the executive bodies]. – Orenburshkiy gosudarstvennyi unyversytet, 2012. – 220 s.

*Поступила (received) 30.06.2022*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Степанов Михайло Сергійович (Степанов Михаил Сергеевич, Mykhailo Stepanov)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: (057) 720-66-25. e-mail: [mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua](mailto:mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua).

**Літовченко Петро Іванович (Литовченко Петр Иванович, Petro Litovchenko)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, e-mail: [pilitovchenko1950@gmail.com](mailto:pilitovchenko1950@gmail.com).

**Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Larysa Ivanova)** – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>, тел.: (057) 720-66-25, e-mail: [larisanangu@gmail.com](mailto:larisanangu@gmail.com).

**Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: [maryna.ivanova@khp.edu.ua](mailto:maryna.ivanova@khp.edu.ua).

**КОВАЛЬОВ В.Д., КЛИМЕНКО Г.П., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., ШАПОВАЛОВ М.В., КОВАЛЕНКО А.В.**

### **СИСТЕМА АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ У КИШЕНЯХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА І ЗУСИЛЛЯМ НАТЯГУ ПРИВОДА ПОЗИЦІОНУВАННЯ ШПИНДЕЛЯ ВАЖКОГО ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА**

Робота присвячена вдосконаленню теорії проектування та розробці на цій основі адаптивних гідростатичних опор нового покоління, а також розробці методів оптимального проектування шпиндельних вузлів і напрямних з такими опорами. Встановлено, що використання режимів рідинного тертя у важконавантажених вузлах є дуже актуальним для важких верстатів підвищеної точності із числовим програмним керуванням. Гідростатичні шпиндельні опори застосовуються у важких токарних верстатах, у яких необхідна точність обертання не забезпечується підшипниками кочення. Розроблено адаптивну систему керування тиском у кишнях гідростатичних опор і зусиллям натягу приводу позионування. Система досить простими засобами дозволяє скорегувати передавальну функцію і виключити можливість коливань. За допомогою системи значно підвищується точність і продуктивність обробки на металорізальних верстатах різного технологічного призначення. Підвищується надійність опор, так як дроселювальні елементи при роботі знаходяться в русі, що перешкоджає заростанню дроселювальної щілини. Підвищується жорсткість і несуча здатність шару мастильного матеріалу. Виключаються налагоджувальні роботи зі встановлення робочого тиску в кишнях опори. Розроблено мехатронну систему адаптивного управління тиском в кишнях гідростатичного шпиндельного вузла підвищеної точності. Розроблено адаптивні регулятори систем живлення опор зі зворотним зв'язком по положенню шпинделя. Розроблено нову конструкцію втулки гідростатичного підшипника із вбудованими ємнісними датчиками зазору.

**Ключові слова:** адаптивне керування, важкий верстат, шпиндельний вузол, гідростатичні опори

### **KOVALOV V.D., KLYMENKO G.P., VASYLCHENKO YA.V., SHAPOVALOV M.V., KOVALENKO A.V. OPTIMIZATION OF CUTTING MODES ON HEAVY MACHINES**

The work is devoted to improvement of the design theory and development on this basis of adaptive hydrostatic supports of new generation, as well as development of methods for optimal design of spindle assemblies and guides with such supports. It is established that the use of fluid friction modes in heavily loaded nodes is very relevant for heavy numerically controlled precision machine tools. Hydrostatic spindle bearings are used in heavy lathes, in which the required accuracy of rotation is not provided by rolling bearings. An adaptive system for controlling the pressure in the pockets of hydrostatic supports and the tensioning force of the positioning drive has been developed. The system makes it possible to adjust the transfer function and exclude the possibility of oscillations by rather simple means. By means of the system the accuracy and productivity of machining on metal-cutting machines of different technological purposes is significantly increased. The reliability of the supports is increased, since the throttle elements are in motion during operation, which prevents the throttle gap from becoming overgrown. Stiffness and load-bearing capacity of the lubricant layer are increased. Debugging work on setting the working pressure in the support pockets is eliminated. The mechatronic system of adaptive control of pressure in the pockets of hydrostatic spindle assembly with increased accuracy is developed. Adaptive regulators of support power supply systems with spindle position feedback have been developed. A new design of hydrostatic bearing sleeve with built-in capacitive clearance sensors is developed

**Keywords:** adaptive control, heavy machine tool, spindle assembly, hydrostatic supports.

**Вступ.** Шпиндельний вузол є одним з основних елементів несучої системи металорізального верстата багато в чому визначає його жорсткість, точність і вібростійкість. У сучасних важких, високошвидкісних металообробних верстатах, прецизійних і унікальних верстатах застосовують шпиндельні вузли та направляючі з безконтактними гідростатичними опорами ковзання у яких точність, здатність навантаження, швидкісні і динамічні характеристики перевершують аналогічні показники інших опор ковзання і кочення. Основні перспективи досліджень і дослідно-конструкторських розробок в цьому напрямку пов'язані зі створенням і комплексним використанням функціональних можливостей гідростатичних опор, що мають вбудовані регулятори адаптивного нагнітання мастила. Подальше вдосконалення теорії, розвиток досліджень і розробка на цій основі адаптивних гідростатичних опор нового покоління, а також розробка методів оптимального проектування шпиндельних вузлів і напрямних з такими опорами є актуальною науково-технічною проблемою машинобудування, рішення якої дозволяє значно підвищити точність і продуктивність обробки на металорізальних верстатах різного технологічного призначення

**Аналіз стану питання.** Використання режимів рідинного тертя у важконавантажених вузлах є дуже актуальним для важких верстатів підвищеної точності із числовим програмним керуванням [1, 2]. Гідростатичні шпиндельні опори (ГШО) застосовуються у важких токарних верстатах, у яких необхідна точність обертання не забезпечується підшипниками кочення. Так, підшипники кочення 5 ступеня точності із внутрішнім діаметром понад 300 мм виготовляються тільки за спеціальним замовленням, і вартість їх росте набагато швидше, ніж діаметр. Ці міркування, а також високі демпфуючі властивості, визначили переваги гідростатичних шпиндельних підшипників перед підшипниками кочення для важких верстатів високої точності [3,4].

Широко розповсюдженими є опори, розроблені фірмою GENDRON (Франція). [5, 6]. Фірмою SKF (Швеція) розроблена типова конструкція гідростатичних підшипників. Ці опори рекомендовано, у першу чергу, для важких металорізальних верстатів підвищеної точності [7].

Більш перспективними є адаптивні ГШО з регуляторами нагнітання робочої рідини, опір яких автоматично змінюється протилежно зміні тиску в несучому шарі. Такі опори мають значно кращі навантажувальні, швидкісні та енергетичні характеристики. При достатній активності регулятора вони можуть працювати в режимі від'ємної піддатливості (шпиндель зміщається назустріч навантаженню), який дозволяє компенсувати негативний вплив пружних деформацій базових елементів верстата на точність обробки [8].

Системи живлення ГШО різноманітні, досить складні та виявляють не менший вплив на працездатність гідростатичних опор, ніж їхня конструкція.

Тип системи живлення ГШО призначають, виходячи із забезпечення необхідної несучої здатності, діапазону навантажень, максимальної жорсткості шару робочої рідини, а також інших експлуатаційних параметрів [9].

Незважаючи на значну кількість конструктивних рішень, регулятори можуть бути розбиті залежно від геометричної форми змінюваного в процесі експлуатації опору на дві групи: із плоскою та із циліндричною кільцевою щільністю [10].

**Метою роботи** є підвищення точності, жорсткості і вібростійкості важких токарних верстатів за рахунок застосування адаптивних шпindelних гідростатичних опор і приводу позиціонування.

**Матеріали, обладнання та умови проведення досліджень.** Теоретичне моделювання проведено за допомогою чисельних методів вирішення крайових задач з диференціальними рівняннями часткових похідних другого порядку. Для синтезу і аналізу адаптивних систем використано методи функціонального та структурного моделювання. Експериментальні дослідження базувалися на теоріях регресивного і кореляційного аналізів, математичної статистики з використанням методики форсованих, прискорених, тривалих іспитів, моментних спостережень, інформаційних банків, евристичних методів. розрахунки шпindelного вузла на жорсткість при максимальних навантаженнях виконуються в пакеті КОМПАС 3D, методом кінцевих елементів.

**Результати досліджень.** Аналіз різних видів систем регулювання: дросельна система, система "насос-кишеня", регуляторна система, адаптивна система дозволяє зробити такі висновки:

1. Для схем живлення гідростатичних опор не існує ідеального рішення;
2. Мінуси дросельної системи живлення: складність розрахунку і проектування; підвищений розігрів масла; зменшується жорсткість; підвищується витрата потужності на прокачування масла; висока ймовірність засмічення дроселів і необхідність їх систематичного очищення.
3. Мінуси живлення типу "насос-кишеня": потрібна велика кількість насосів малого обсягу, або багатопотокові насоси спеціальної конструкції; є залежність товщини масляного шару від температури.
4. Мінуси регуляторів для розімкнутих опор - є необхідність регулювати опір кожного з них для забезпечення рівності витрати. При великому зміні тиску в кишенях витрати через окремі регулятори не однакові. Регулятори щільного типу схильні до засмічення, більшість регуляторів має низьке власне демпфірування.

Для вирішення проблеми регулювання живлення гідростатичних опор запропоновано систему адаптивного управління тиском в кишенях гідростатичних опор шпindelного вузла токарного верстата. Система дозволяє досить простими засобами скорегувати передавальну функцію і виключити можливість коливань, спрощує налаштування. Система являє собою комплекс датчиків для збору даних, регульовані електромагнітні клапани на кожній кишені, мікроконтролер управління.

Структурна схема адаптивного управління гідростатичними підшипниками представлена на рис. 1. Принцип дії даної схеми полягає в тому, що ємнісний датчик відстані 1, зчитує зміни ємності конденсатора в кишенях 2, сигнал з датчика надходить на мікроконтролер 3. Мікроконтролер на основі керуючої програми перетворює сигнал з ємнісного датчика про змінену ємності конденсатора в величину зазору в кишені. За алгоритмом керуючої програми розраховується тиск в кожній кишені, необхідне для усунення відхилення від осьової лінії шпинделя, відповідні сигнали подаються на електромагнітні клапани 4. Необхідний тиск в системі створюється насосами 5, приводиться в дію електродвигуном 6.

Для здійснення точного вимірювання положення шпинделя під час обробки необхідний датчик вимірювання зазору в кишені. До системи контролю зазором в гідростатичних опорах відносяться ємнісні датчики, які за допомогою проводів підключаються до плати управління (рис 2).

Ємнісний датчик відстані являє собою конденсатор, складений з двох пластин, розділених діелектриком. Ємнісні перетворювачі використовують метод зміни ємності конденсатора при зміні відстані між обкладками.

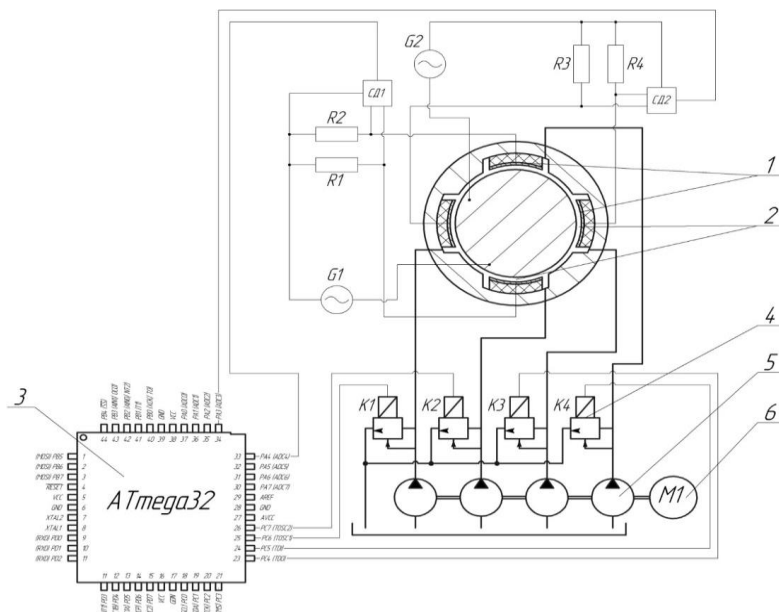


Рис. 1 – Структурна схема адаптивного управління гідростатичними підшипниками

Для здійснення точного вимірювання положення шпинделя під час обробки необхідний датчик

У гідростатичному підшипнику однієї пластиною служить шпиндель, а інший – мідна пластина, яка знаходиться на дні кишені втулки. В якості діелектрика виступає масло.

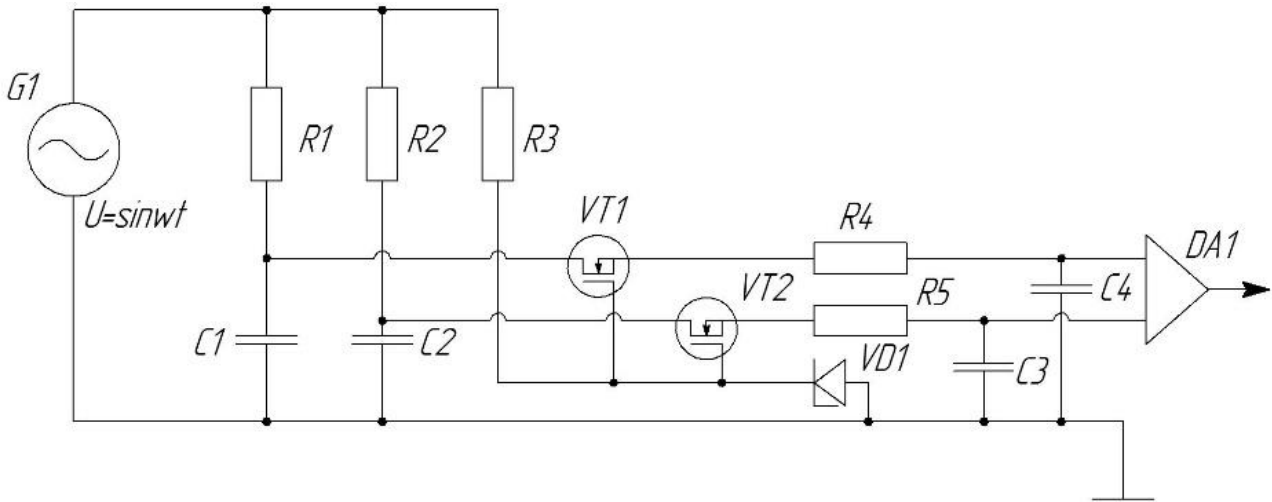


Рис. 2 – Схема ємнісного перетворювача

ЕРС в ланцюзі живлення вимірювального моста визначається з виразу:

$$U_{ит} = \sqrt{U_C^2 + U_{R1}^2}; \quad (1)$$

де  $U_C$  – напруга на обкладках датчика;

$U_{R1}$  – напруга на вимірювальному резисторі.

Відповідно до закону Ома падіння напруги на вимірювальних резисторах:

$$U_{R1} = I \cdot R_1; \quad (2)$$

де  $I$  – сила струму однієї гілки вимірювального моста;

$R_1$  – опір вимірювального резистора.

Струм в гілках вимірювального моста:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + x_C^2}} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + \omega \cdot C}}; \quad (3)$$

де  $U$  – напруга джерела живлення вимірювального моста;

$x_C$  – реактивний опір ємнісного датчика;

$\omega$  – кругова частота джерела живлення;

$C$  – ємність датчика.

Ємність датчика:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}; \quad (4)$$

де  $d = h_{карм.}$  – відстань між обкладками датчика;

$S$  – площа обкладки датчика;

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність масла;

$\varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність вакууму.

Відповідно до вище наведених виразів напруга на вимірювальному резисторі однієї гілки моста:

$$U_{R1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}}} \cdot R_1; \quad (5)$$

Виявляється обернено пропорційним кореню квадратному з величини робочого зазору в опорі. Напруга для вимірювального моста в цілому буде вдвічі більша. Ланцюжки з елементів VT1, VT2, R4, R5, C3, C4 – утворюють двох каналний синхронний детектор, який необхідний для випрямлення високо частотних сигналів з вимірювальних резисторів. Ланцюжок R3, VD1 – забезпечує синхронний детектор, синхронізуючою напругою від джерела живлення. Отриманий сигнал посилюється диференціальним підсилювачем DA1.

Для практичної реалізації розглянутого технічного рішення на існуючому обладнанні найбільш підходящим є керований запобіжний клапан. Принцип роботи полягає в установці на кожен кишеню швидкодіючого датчика зазору, і установці на живильну магістраль кишені керованого по тиску запобіжного клапана. Конструкція такого клапана показана рис. 3.

Цей клапан відрізняється від звичайного запобіжного клапана тим, що замість нажимної пружини в ньому встановлено нажимний пристрій магнітоелектричної системи. Такий пристрій справедливо буде назвати не клапаном, а регулятором, оскільки в межах діапазону регулювання системи він повинен працювати в режимі дроселювання.

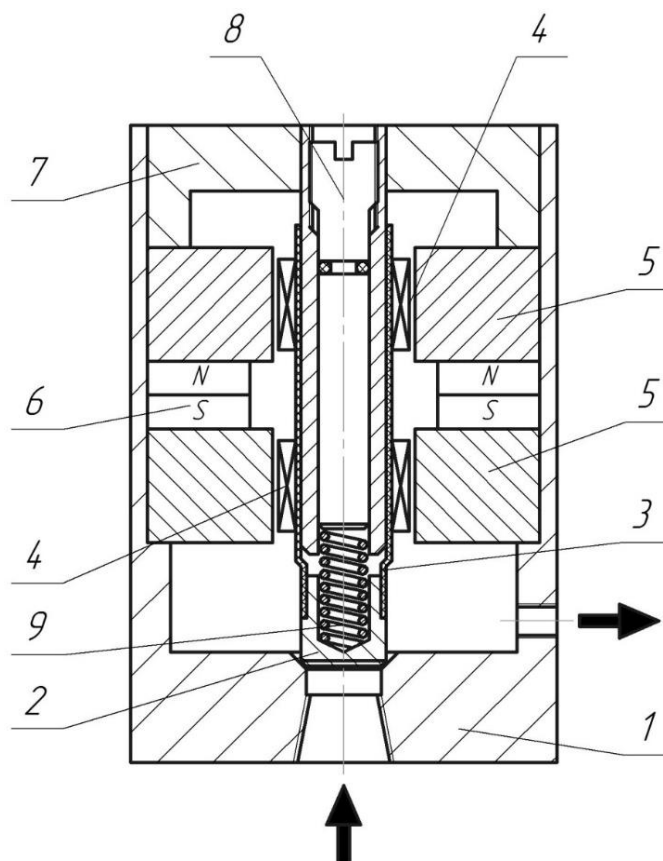


Рис. 3 – Конструкція керованого запобіжного клапана

1 – корпус з немагнітного сплаву; 2 – ядро; 3 – діелектричний каркас; 4 – котушка; 5 – магнітопровід; 6 – постійний магніт; 7 – кришка; 8 – направляючий стержень; 9 – пружина.

У свою чергу зусилля  $F$  натискного пристрою визначається за законом Ампера:

$$F = B \cdot I \cdot L \quad (6)$$

де  $B$  - магнітна індукція в робочому зазорі пристрою, що визначається параметрами постійного магніту 6;  
 $I$  - величина струму в котушці 4;  
 $L$  - робоча довжина провідника в котушці 4.

Провели розрахунки шпindelного вузла на жорсткість при максимальних навантаженнях виконується в пакеті КОМПАС 3D, методом кінцевих елементів.

Таблиця 1 – Результат еквівалентного напруження

Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Еквівалентне напруження по Мизесу	SVM [МПа]	0.000026	61.937571



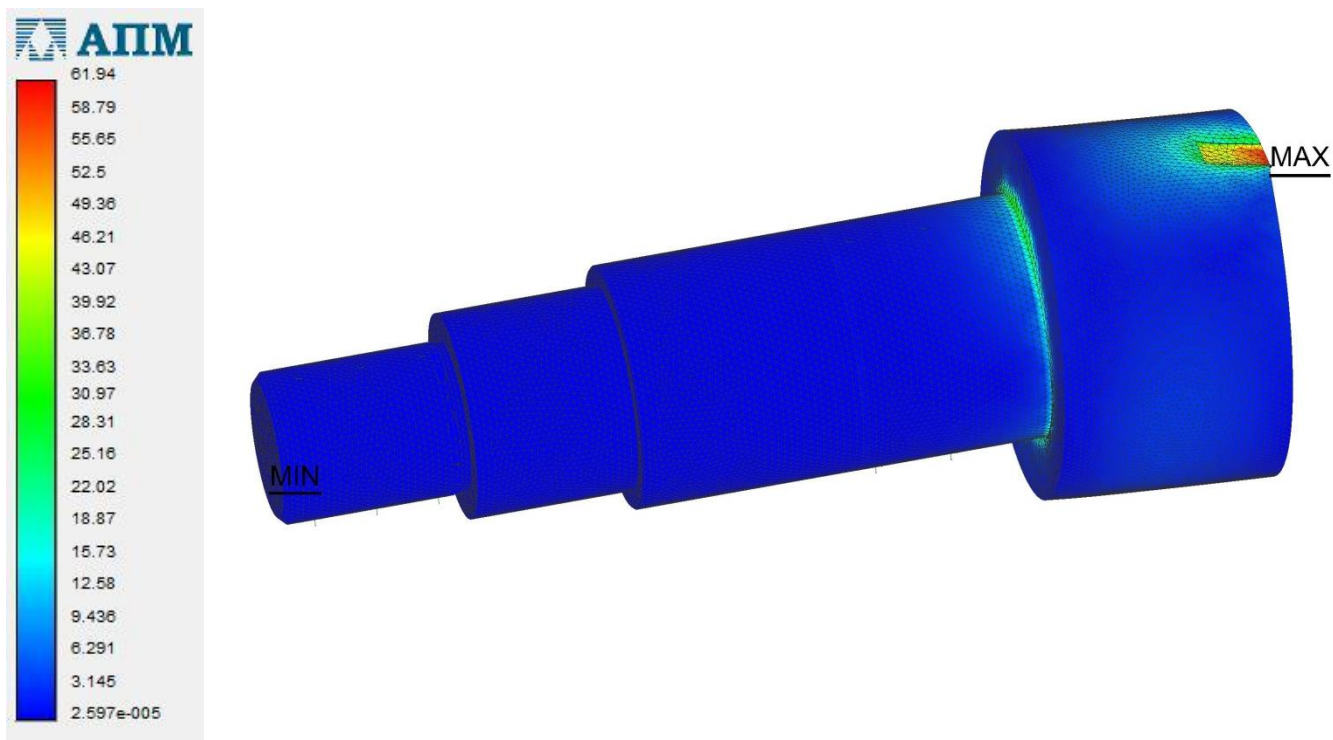


Рис. 4 – Еквівалентне напруження

Таблиця 2 – Результат сумарного лінійного переміщення

Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінійне переміщення	USUM [мм]	0	0.063994

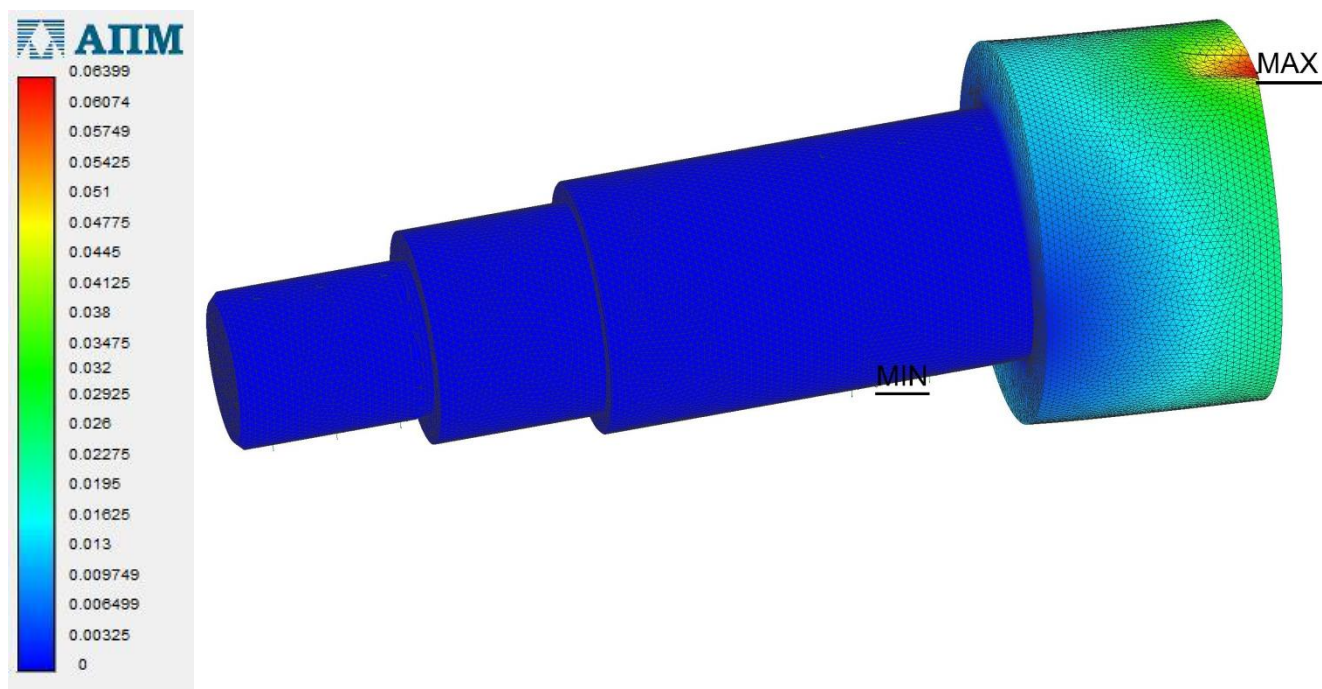


Рис. 5 – Сумарне лінійне переміщення



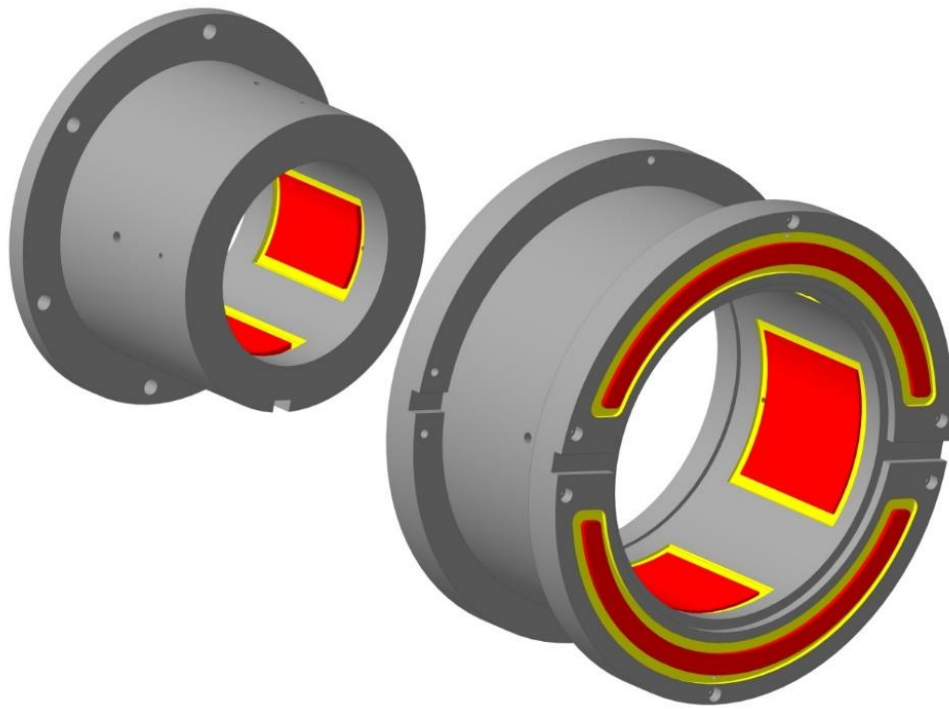


Рис. 6 – 3D модель гідростатичних підшипників

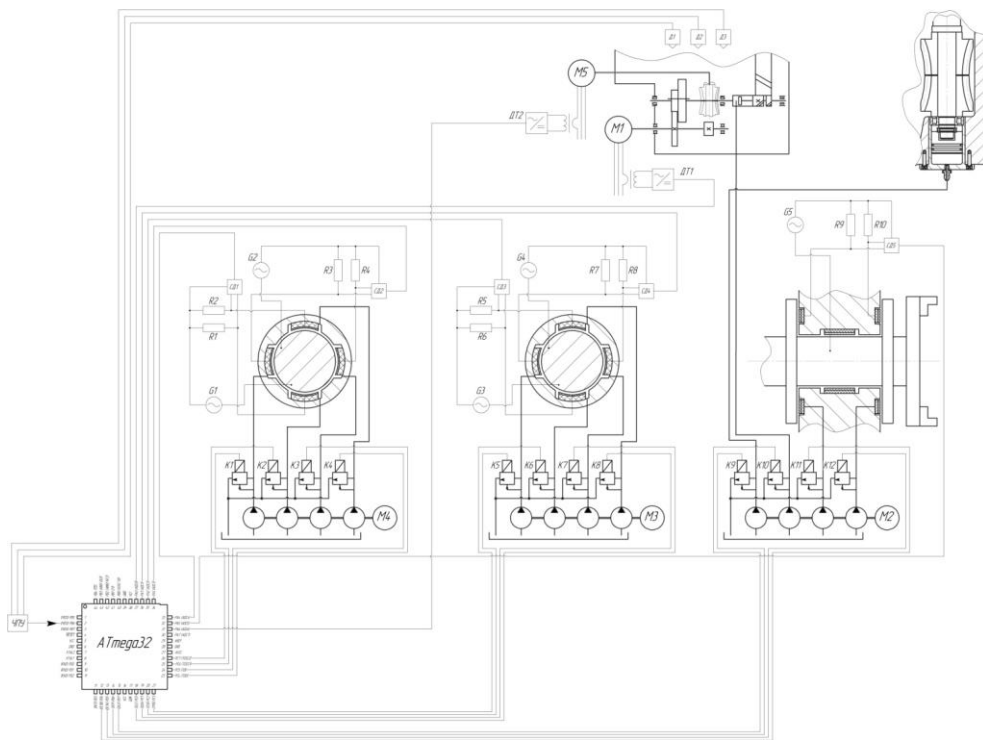


Рис. 7 – Структурна схема

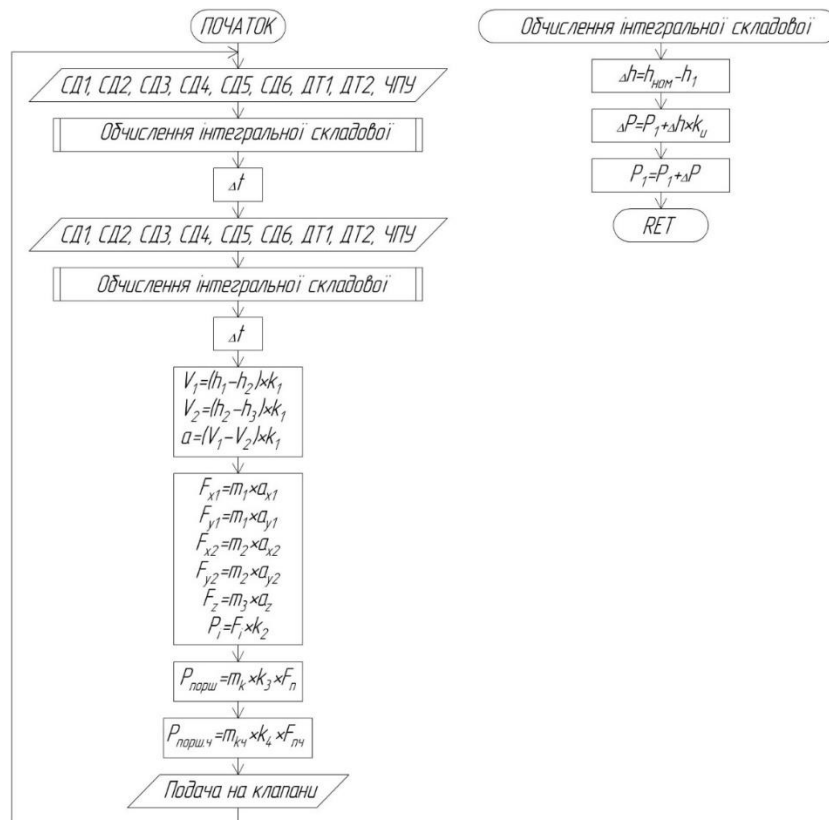


Рис. 8 – Блок - схема алгоритму роботи системи управління

**Висновки.** У сучасних важких, високошвидкісних металообробних верстатах, прецизійних і унікальних верстатах застосовують шпиндельні вузли та направляючі з безконтактними гідростатичними опорами ковзання у яких точність, здатність навантаження, швидкісні і динамічні характеристики перевершують аналогічні показники інших опор ковзання і кочення. Основні перспективи досліджень і дослідно-конструкторських розробок в цьому напрямку пов'язані зі створенням і комплексним використанням функціональних можливостей гідростатичних опор, що мають вбудовані регулятори адаптивного нагнітання мастила. Розроблено адаптивну систему керування тиском у кишенях гідростатичних опор і зусиллям натягу приводу позиціонування. Система дозволяє скорегувати передавальну функцію і виключити можливість коливань. За допомогою системи значно підвищується точність і продуктивність обробки на металорізальних верстатах різного технологічного призначення. Підвищується надійність опор, жорсткість і несуча здатність шару мастильного матеріалу. Виключаються налагоджувальні роботи зі встановлення робочого тиску в кишенях опори. Розроблено мехатронну систему адаптивного управління тиском в кишенях гідростатичного шпиндельного вузла підвищеної точності. Розроблено адаптивні регулятори систем живлення опор зі зворотним зв'язком по положенню шпинделя. Розроблено нову конструкцію втулки гідростатичного підшипника із вбудованими смісними датчиками зазору.

#### Список літератури

1. X.B. Li, X. Wang, M. Li, Y.S. Ma, Y. Huang The Research Status and Progress of Heavy/Large Hydrostatic Thrust Bearing Adv. Mech. Eng. (2014), 10.1155/2014/982584
2. Hu, Lai & Chen, Yaolong. (2020). Research on optimization of a high precision hydrostatic turntable. Manufacturing Technology. 20. 10.21062/mft.2020.119.
3. Z.F. Liu, Y.M. Wang, L.G. Cai, Y.S. Zhao, Q. Cheng, X.M. Dong A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications Adv. Mech. Eng., 9 (2017), 10.1177/1687814017730536
4. G. Chen, J. Wen Effects of size and raceway hardness on the fatigue life of large rolling bearing J. Mech. Sci. Technol., 29 (2015), pp. 3873-3883, 10.1007/s12206-015-0833-3
5. Бушуев В. В. Гидростатическая смазка в тяжелых станках / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 1989. – 162 с.
6. Бушуев В. В. Гидростатические опоры тяжелых станков / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 1989. – 176 с.
7. Ковалев В. Д. Опоры и передачи жидкостного трения станочного оборудования / В. Д. Ковалев, О. Ф. Бабин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 188 с
8. Демин В. Г. Проектирование адаптивных гидростатических опор для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков. / В. Г. Демин, Я. Ю. Пикалов, С. Н. Шатохин // Технология машиностроения. –2008. – №9. – С. 27
9. Максимов В. А. Гидродинамическая теория смазки / В. А Максимов, М. К. Усков. – М. : Наука, 1985. – 144 с.
10. Левит Г. А. Расчет и выбор основных параметров гидростатических направляющих с дроссельным регулированием / Г. А. Левит, Б. Г. Лурье. – М. : ЭНИМС, 1985. – 107 с.

#### References (transliterated)

1. Y. C. Shin and Y. S. Joo Optimization of machining conditions with practical constraints / International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 12, pp. 2907–2919, 1992.
2. M Bogoljubova, A Afonassov, V Kozlov and O. Sumtsova Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012045 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012045.
3. Bhuiyan, T. and Ahmed, I. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process / SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):2014, doi : 10.4271/2014-01-9097.

4. Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, and Ahmed El Khalfi Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm / Hindawi Modeling and Simulation in Engineering Volume 2017, Article ID 1940635, 10 pages.
5. Mazur M.P. Osnovy teoriiy rizannya materialiv: pidruchnyk [dlya vyshch. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, YU.M. Vnukov, V.L. Dobroskok, V.O. Zalloha, YU.K. Novos'olov, F.YA. Yakubov ; pid zah. red. M.P. Mazura. – L'viv : Novyy Svit–2000, 2010. – 422 s.
6. Klimenko G.P. Osnovy ratsional'noy ekspluatatsii rezhushchego instrumenta : Ucheb. posobiye. – Kramatorsk: DGMA, 2006. – 200 s.
7. Klimenko G. P. Opredeleniye ratsional'nykh reglamentov ekspluatatsii instrumentov dlya tyazhelykh stankov s CHPU / G. P. Klimenko, YA. V. Vasil'chenko, A. N. Lishenko // Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh = Cutting & tool in technological system : mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – Khar'kov : NTU "KHPI", 2016. – Vyp. 86. – S. 49-56.

Поступила (received) 03.04.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Клименко Галина Петрівна** (*Klymenko Galyna Petrivna*) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1022-6324> ; e-mail: [galynaklymenko1@gmail.com](mailto:galynaklymenko1@gmail.com)

**Ковальов Віктор Дмитрович** (*Kovalev Viktor Dmytrovych*) – доктор технічних наук, професор, ректор Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5091-5856>, e-mail: [kovalov.viktor@gmail.com](mailto:kovalov.viktor@gmail.com)

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

**Шапвалов Максим Валерійович** (*Shapovalov Maksym Valeriyovych*) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-8834> , e-mail: [harleymax1979@gmail.com](mailto:harleymax1979@gmail.com)

**Коваленко Антон Валентинович** (*Kovalenko Anton Valentinovich*)- аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: , e-mail: [anton.kovalenko8904@gmail.com](mailto:anton.kovalenko8904@gmail.com)

**НОВІКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.**

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Розроблено уточнену математичну модель визначення пружних переміщень, які виникають в технологічній системі при механічній обробці, в якій узагальнено аналітичний опис пружного переміщення при шліфуванні та лезовій обробці. Це дозволило встановити, що найменші пружні переміщення можна забезпечити при шліфуванні шляхом суттєвого перевищення швидкістю шліфування швидкості різання при лезовій обробці. Однак при цьому енергоємність обробки значно більше (до 10 разів), ніж при лезовій обробці, що обмежує технологічні можливості шліфування. Тому на фінішних операціях ефективно використовувати технології лезової обробки. Особливо це відноситься до технологій високошвидкісного різання, які з кінематичної точки зору не поступаються шліфуванню та забезпечують зниження пружних переміщень, енергоємності та підвищення точності й продуктивності обробки. Встановлено, що обробку отворів в кілька проходів доцільно здійснювати сверлами з різними діаметрами, збільшуючи діаметр за проходами. Показано, що при розточуванні простіше забезпечити необхідну точність, ніж при обробці осевими інструментами. При розфрезуванні отворів можна досягти ще більшого підвищення точності та продуктивності обробки.

**Ключові слова:** пружні переміщення, технологічна система, шліфування, енергоємність обробки, високошвидкісне різання

**NOVIKOV FV, POLYANSKY VI**

## **TECHNOLOGICAL REGULARITIES OF IMPROVING ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF MECHANICAL PROCESSING**

An updated mathematical model for determining the elastic displacements that occur in the technological system during machining, which summarizes the analytical description of the elastic displacement during grinding and blade machining. This allowed us to establish that the smallest elastic displacements can be ensured during grinding by significantly exceeding the speed of the cutting speed during blade machining. However, the energy consumption of processing is much higher (up to 10 times) than with blade processing, which limits the technological capabilities of grinding. Therefore, in finishing operations to effectively use the technology of blade processing. This is especially true of high-speed cutting technologies, which from a kinematic point of view are not inferior to grinding and provide a reduction in elastic displacements, energy consumption and increase the accuracy and productivity of processing. It is established that processing of openings in several passes is expedient to carry out drills with various diameters, increasing diameter on passes. It is shown that it is easier to ensure the required accuracy when boring than when machining with axial tools. By milling holes, an even greater increase in machining accuracy and productivity can be achieved.

**Keywords:** elastic displacements, technological system, grinding, energy consumption of processing, high-speed cutting

**НОВІКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.**

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Разработана уточненная математическая модель определения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при механической обработке, в которой обобщено аналитическое описание упругого перемещения при шлифовании и лезвийной обработке. Это позволило установить, что наименьшие упругие перемещения можно обеспечить при шлифовании путем существенного превышения скоростью круга скорости резания при лезвийной обработке. Однако при этом энергоёмкость обработки значительно больше (до 10 раз), чем при лезвийной обработке, что ограничивает технологические возможности шлифования. Поэтому на финишных операциях эффективно использовать технологии лезвийной обработки. Особенно это относится к технологиям высокоскоростного резания, которые с кинематической точки зрения не уступают шлифованию и обеспечивают снижение упругих перемещений, энергоёмкости и повышение точности и производительности обработки. Установлено, что обработку отверстий в несколько проходів целесообразно производить сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр по проходам. Показано, что при растачивании проще обеспечить необходимую точность, чем при обработке осевыми инструментами. При расфрезеровывании отверстий можно добиться еще большего повышения точности и производительности обработки.

**Ключевые слова:** упругие перемещения, технологическая система, шлифование, энергоёмкость обработки, высокоскоростное резание

**Вступ.** Сучасне машинобудування вимагає високопродуктивного й високоточного виготовлення деталей машин на основі використання інноваційних технологій механічної обробки, високообертових металорізальних верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ) типу «обробний центр» та прогресивних конструкцій різальних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Із їх застосуванням на промислових підприємствах України з'явилися нові перспективи підвищення точності й продуктивності обробки та виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції, успішному виходу промислових підприємств на міжнародні ринки. Однак, як показує практика, технологічні можливості цих металорізальних верстатів із ЧПУ та різальних інструментів недостатньо вивчені. Фактично відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональних методів обробки, режимів різання та характеристик інструментів, що не дозволяє забезпечити значне підвищення продуктивності та точності обробки. Це ускладнює їх практичне використання та вимагає проведення подальших досліджень. Тому для ефективного застосування в машинобудівному виробництві сучасних технологій механічної обробки необхідно вміти визначати раціональні умови обробки, які забезпечують, в першу чергу, високі показники точності й продуктивності обробки. Для цього важливо розробити математичну модель управління пружними переміщеннями при механічній обробці, які є найбільш суттєвим чинником підвищення точності та продуктивності обробки. Для вибору найкращих варіантів механічної обробки за критеріями точності та продуктивності в роботі запроваджено теоретичне порівняння величин пружних переміщень, виникаючих в процесах шліфування та лезової обробки.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Проблемі математичного моделювання пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при механічній обробці, у науково-технічній літературі приділено достатньо велику увагу [1; 4; 6; 7]. В основному це відноситься до методів шліфування [3; 9; 12], де остаточно формуються параметри точності обробки. На цій основі розроблено ефективні технологічні процеси шліфування, які поєднують операції попередньої й кінцевої обробки із забезпеченням достатньо високих показників точності та продуктивності обробки [2; 3; 5; 13]. Однак, при цьому технологічні можливості управління пружними переміщеннями в умовах

лезової обробки вивчені недостатньо повно. Це вимагає пошуку нових технологічних рішень для їх практичної реалізації. Тому важливо з єдиних позицій провести теоретичний аналіз шляхів зменшення пружних переміщень, виникаючих в умовах шліфування та лезової обробки, й на цій основі визначити найбільш ефективні методи обробки, які забезпечують найбільш значне підвищення точності та продуктивності обробки.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є теоретичний аналіз закономірностей формування пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при механічній обробці, та обґрунтування шляхів їх зменшення для підвищення точності та продуктивності обробки.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- аналітично описати основні параметри точності оброблюваних поверхонь деталей: точність розміру й точність форми, в залежності від пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при шліфуванні та лезовій обробці;

- встановити аналітичні залежності для визначення величин пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при шліфуванні та лезовій обробці, та обґрунтувати умови їх зменшення;

- провести теоретичне порівняння величин пружних переміщень, виникаючих в процесах шліфування й лезової обробки, та на цій основі обґрунтувати умови здійснення високоточної та високопродуктивної механічної обробки деталей машин.

**Матеріали дослідження.** У роботі для обґрунтування технологічних закономірностей підвищення точності та продуктивності механічної обробки аналітично визначено пружні переміщення (похибки розміру та форми поверхні), які виникають при точінні, шліфуванні, розточуванні, свердлінні й фрезуванні, та визначають точність обробки.

Для розрахунку пружного переміщення  $y$  при поздовжньому точінні слід скористатися рівнянням рівноваги технологічної системи, що знаходиться під дією радіальної складової сили різання  $P_y$  і пружно-відновлювальної сили  $c \cdot y$  [8]:

$$\frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{piz}} \cdot (t - y_1) = c \cdot y_1 \quad (1)$$

де  $c$  – приведена жорсткість технологічної системи, Н/м;

$\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;

$K_{piz} = P_z / P_y$  – коефіцієнт різання;

$P_z, P_y$  – тангенціальна та радіальна складові сили різання, Н;

$S$  – подача, м/об.;

$t$  – глибина різання, м;

$\varphi$  – головний кут різця в плані.

Тоді, виходячи із залежності (1), величина пружного переміщення на першому проході інструменту  $y_1$  визначиться залежністю:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}; \quad (2)$$

Зі збільшенням кількості проходів інструменту  $n$  пружне переміщення  $y$  визначається:

$$y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_3 &= \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \\ &= \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

У підсумку прийшли до геометричної прогресії зі знаменником  $q = \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}$ . Отже, зі збільшенням

кількості проходів інструмента  $n$  величина пружного переміщення  $y_n$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення, яке визначається сумою нескінченної геометричної прогресії:

$$y_n = t \cdot \left( \frac{a_1}{1-q} \right) = \frac{t}{\left( \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)} = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{piz} \cdot V}, \quad (5)$$

де  $a_1 = \frac{1}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}$  – перший член геометричної прогресії;

$Q = S \cdot t \cdot V$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;

$V$  – швидкість різання, м/с.

Із порівняння залежностей (2) – (5), видно, що при першому проході інструмента пружне переміщення  $y_1$  менше, ніж на кожному наступному проході (тобто  $y_1 < y_n$ ). Отже, ефективно знімання всього припуску при поздовжньому точінні здійснювати за один проход інструменту. Це дозволить зменшити величину пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, та, відповідно, підвищити точність і продуктивність обробки.

При круглому поздовжньому шліфуванні  $K_{piz} = P_z / P_y = K_{uz}$  (де  $K_{uz}$  – коефіцієнт шліфування), а радіальна складова сили різання  $P_y$  виражається [11]:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q}{K_{uz} \cdot V_{kp}}, \quad (6)$$

де  $Q = H \cdot t \cdot V_{dem}$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – ширина шліфування, м.

Тоді, із урахуванням залежностей (1) і (6), пружне переміщення  $y$  визначається:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}. \quad (7)$$

За умови рівноваги технологічної системи, що знаходиться під дією радіальної складової сили різання  $P_y$  і пружно-відновлювальної сили  $c \cdot y$ , виходячи із залежності (7), маємо:

$$\frac{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}}{K_{uz} \cdot V_{kp}} \cdot (t - y_1) = c \cdot y_1. \quad (8)$$

Після перетворень рівняння (8) величина пружного переміщення на першому проході шліфувального круга  $y_1$  визначиться залежністю:

$$y_1 = \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)}. \quad (9)$$

Пружні переміщення  $y$  за  $n$  проходями круга визначаються залежностями:

$$y_2 = \frac{t + y_1}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)} = \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)} + \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)^2}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y_3 &= \frac{t + y_2}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)} = \\ &= \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)} + \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^2} + \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)^3}. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналіз залежностей (9) – (11) показує, що має місце геометрична прогресія зі знаменником  $q = \frac{1}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)}$ ,

тобто зі збільшенням кількості проходів інструмента  $n$  величина пружного переміщення  $y_n$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення:

$$y_n = t \cdot \left( \frac{a_1}{1-q} \right) = \frac{t}{\left( \frac{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}{\sigma \cdot H \cdot V_{dem}} \right)} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{uz} \cdot V_{kp}}, \quad (12)$$

де  $a_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{шл} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}\right)}$  – перший член геометричної прогресії;

$Q = H \cdot t \cdot V_{дем}$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – ширина шліфування, м;

$V_{дем} \cdot V_{кр}$  – швидкості деталі та круга, м/с.

Як відомо, відношення  $\sigma / K_{піз}$  при точінні значно менше ніж при шліфуванні (у зв'язку з меншою інтенсивністю тертя в зоні різання). Тому, порівнюючи залежності (5) і (12), та незважаючи на умову  $V_{кр} > V$ , при точінні можна досягти зменшення пружного переміщення  $y_n$  та, відповідно, підвищення точності й продуктивності обробки.

Виходячи із цього, у роботі обґрунтовано умови підвищення точності обробки отвору лезовими інструментами [10]. Для цього визначено похибку форми оброблюваного отвору (як різницю найбільшого  $y_1$  і найменшого  $y_2$  пружного переміщень у двох протилежних напрямках) при розточуванні (рис. 1) за проходами інструмента при розбіжності осей різця та отвору на величину  $\Delta$ :

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2 = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}; \quad (13)$$

$$\Delta y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}; \quad (14)$$

$$\Delta y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}, \quad (15)$$

де  $t_1 = t + \Delta$ ;  $t_2 = t - \Delta$  – максимальна й мінімальна глибини різання, м.

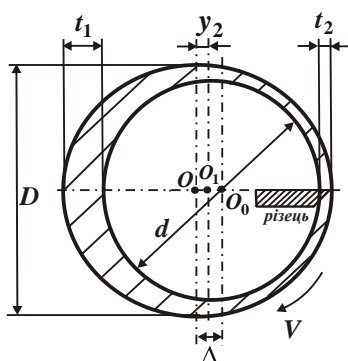


Рис. 1 – Розрахункова схема пружного переміщення при розточуванні отвору із початковим діаметром  $d$

Як видно із залежностей (13) – (15), зі збільшенням кількості проходів інструмента  $n$  величина  $y_n$  прагне до нуля. Це дозволяє усунути похибку форми оброблюваного отвору у вигляді невісесиметричності. За умови  $\left(\frac{c \cdot K_{піз}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} > 1\right)$  можна значно швидше домогтися заданої точності форми оброблюваної поверхні. Це досягається

застосуванням технологій розточування отворів різцями із синтетичних надтвердих матеріалів, які характеризуються високою твердістю й гостротою ріжучої кромки та дозволяють зменшити умовне напруження різання  $\sigma$ . Виходячи із цього, також ефективним є застосування сучасних збірних твердосплавних і керамічних різців зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва.

У роботі визначено пружні переміщення свердла за  $n$  проходів при розсвердлованні отвору зі зміщенням осі свердла з центром  $O$  відносно осі оброблюваного отвору з центром  $O_0$  на величину  $\Delta$  (рис. 2):

$$y_1 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{K_{піз} \cdot c}; \quad (16)$$

$$y_2 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{піз} \cdot c}\right)^2 \cdot \Delta; \quad (17)$$



$$y_n = \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{\text{пiз}} \cdot c} \right)^n \cdot \Delta. \quad (18)$$

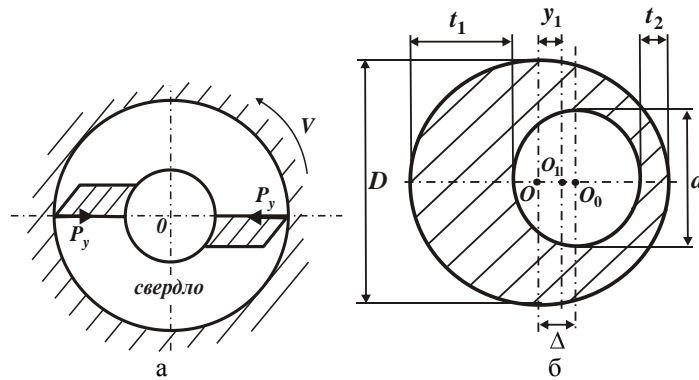


Рис. 2 – Схема процесу розсвердлювання отвору (а) та розрахункова схема визначення величини пружного переміщення свердла при розсвердлюванні отвору з початковим діаметром  $d$  (б)

Сумарне уточнення  $\varepsilon_{\text{сум}}$  та уточнення на проході  $\varepsilon$  визначаються залежностями:

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \frac{\Delta}{y_n} = \left( \frac{K_{\text{пiз}} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^n; \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{K_{\text{пiз}} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}. \quad (20)$$

Оскільки уточнення на проході  $\varepsilon > 1$ , то, виходячи із залежності (20), відношення  $\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{\text{пiз}} \cdot c} < 1$ . Отже, з

кожним наступним проходом свердла величина його пружного переміщення зменшується  $y_n \rightarrow 0$ . Це також впливає із залежностей (16) – (18). Однак, похибка форми отвору буде визначатися величиною пружного переміщення свердла на першому проході, яке описується залежністю (16). Чим воно менше, тим менше похибка форми отвору. Тому необхідно всі параметри, які входять до чисельника залежності (16), зменшувати, а всі параметри, які входять до знаменника залежності (16), навпаки, збільшувати.

Таким чином встановлено, що основним недоліком обробки отворів мірними осьовими інструментами (свердлами, зенкерами, розгортками) є перевищення діаметром обробленого отвору діаметра інструмента у зв'язку з нерівномірністю припуску, що знімається, й виникаючими пружними переміщеннями в технологічній системі. Це, як встановлено, знижує точність оброблюваного отвору (точності його розміру й форми).

Важливим чинником підвищення ефективності процесу свердління є застосування сучасних збірних твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями. Так, застосування свердла Ø33 мм (корпус свердла KSE250350390; ріжуча пластина SM565330 виготовлена з матеріалу PREMIUM HSS M48 зі зносостійким покриттям TiAlN) виробництва компанії YG1 (Південна Корея) на операції глибокого свердління (з глибиною 220 мм і виходом на циліндричну поверхню деталі з матеріалу 09ГС2) показало його високу працездатність. Це дозволило в 2 рази підвищити продуктивність. Основний час обробки  $\tau$  отвору склав 2 хв., а за існуючою технологією свердління отвору із застосуванням традиційного твердосплавного інструменту – 4 хв. (рис. 3). Частота обертання шпинделя 450 мм/хв.; подача 0,33 мм/об; подача охолоджувальної рідини виконувалася через державку в зону різання. У процесі різання мало місце інтенсивне дроблення й видалення стружки. Обробка деталі (із 48 отворами) здійснена за 96 хв. Стійкість ріжучої пластини склала 72 отвори або 1,5 деталі (144 хвилини). Також застосування даного інструменту дозволило виключити з налагодження операцію проміжного свердління.

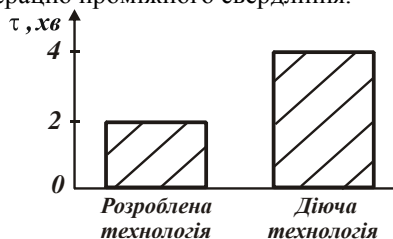


Рис. 3 – Значення основного часу обробки  $\tau$  отвору свердлінням за розробленою та діючою технологіями

Необхідно звернути увагу на те, що якщо обробка отвору на першому проході виконується свердлом із діаметром, рівним заданому діаметру оброблюваного отвору, то це призведе до утворення похибки обробки отвору величиною  $\Delta$ . Причому, усунути цю похибку на наступних проходах свердла неможливо. Тому обробку отвору за

кілька проходів доцільно здійснювати свердлами різних діаметрів, збільшуючи діаметр від проходу до проходу. Аналогічно встановлюються діаметри зенкерів і розверток при обробці отворів за кілька проходів, що забезпечить задану точність оброблюваного отвору.

При розточуванні отвору з нерівномірним припуском, тобто при його обробці немірним інструментом, діаметр оброблюваного отвору формується лише за рахунок зменшення величини пружного переміщення різця або деталі, тоді як в попередньому випадку (при розсвердлюванні отвору) діаметр отвору визначається сумою діаметра свердла та його пружного переміщення. Отже, при розточуванні отвору значно простіше домогтися необхідної точності його обробки, ніж при розсвердлюванні. Для цього достатньо керувати лише величиною пружного переміщення різця. Так, при першому проході різця величина його пружного переміщення  $y_1$  в радіальному напрямку, виходячи з

$$\text{співвідношень [11]: } y_1 = \frac{P_{y1}}{c} = \frac{P_{z1} \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t - y_1) \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c}, \text{ дорівнює:}$$

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (21)$$

де  $P_{y1}$ ,  $P_{z1}$  – радіальна й тангенціальна складові сили різання на першому проході, Н.

Зменшити величину  $y_1$ , згідно залежності (21), можна збільшенням другого доданка, що є в знаменнику. При другому проході різця величина його пружного переміщення  $y_2$  визначиться:

$$y_2 = \frac{(t + y_1)}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}. \quad (22)$$

При  $n$ -му проході маємо:

$$y_n = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} + \dots + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (23)$$

Характер зміни  $y_n$ , виходячи із залежності (23), підкоряється геометричній прогресії, тоді [9]:

$$y_n = y_1 \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{-n})}{(1 - \varepsilon)} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}) = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c \cdot V} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad (24)$$

де  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  – уточнення на проході.

Як видно, зі збільшенням кількості проходів різця  $n$  величина  $y_n$  збільшується. Тому необхідно розточування отвору виконувати за 1 – 3 проходи ріжучого інструмента, збільшуючи відношення  $\left(\frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} > 1\right)$ . Виходячи із залежності (24), зменшити величину  $y_n$  при заданій продуктивності  $Q = S \cdot t \cdot V$  можна шляхом збільшення швидкості різання  $V$ , пропорційно зменшуючи подачу  $S$  або глибину різання  $t$ .

На основі залежності (24) важливо виконати аналіз можливостей зменшення величини  $y_n$  при внутрішньому шліфуванні. У цьому випадку кут  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$ ;  $V = V_{dem}$  й, відповідно, всі закономірності, встановлені для лезової обробки, залишаються справедливими й для внутрішнього шліфування. Тому доцільно збільшувати швидкість деталі  $V_{dem}$  при одночасному зменшенні подачі  $S$  й глибини шліфування  $t$ . Це сприяє підвищенню точності та продуктивності обробки. Як відомо, при шліфуванні параметр  $\sigma$  більше, ніж при лезовій обробці із-за інтенсивного тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Тому уточнення на проході  $\varepsilon$  буде менше, що призведе до збільшення величини  $\varepsilon^{-n}$  і зменшення множника  $(1 - \varepsilon^{-n})$  у залежності (24). Це певною мірою компенсуватиме збільшення величини  $y_n$  зі збільшенням параметра  $\sigma$ . Тому збільшення величини  $y_n$  при внутрішньому шліфуванні не буде настільки значним порівняно з лезовою обробкою. При глибинному внутрішньому шліфуванні з відносно невеликою швидкістю деталі  $V_{dem}$  величина  $y_n$  збільшиться. Отже, доцільно використовувати схему багатопрохідного внутрішнього шліфування.

При розфрезуванні отвору величина  $y_n$  підпорядковується тим самим закономірностям, що й при розточуванні та внутрішньому шліфуванні. Так, пружне переміщення за перший і  $n$ -ний проходи визначиться:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz} \cdot V_{\phi p}}{\sigma \cdot H \cdot V_{\phi em}}\right)}; \quad (25)$$

$$y_n = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{piz} \cdot V_{\phi p}}, \quad (26)$$

де  $Q = H \cdot t \cdot V_{\phi em}$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – ширина фрезування, м;

$V_{\phi em}, V_{\phi p}$  – швидкості деталі та фрези, м/с.

Порівнюючи залежності (25) і (26), видно, що на першому проході величина пружного переміщення менше, ніж на  $n$ -му проході. Оскільки при високошвидкісному розфрезуванні отвору відношення  $\sigma / K_{piz}$  менше, ніж при шліфуванні, а  $V_{\phi p} \approx V_{\phi p}$ , то в цьому випадку (із порівняння залежностей (12) і (26)) величина  $y_n$  буде меншою, ніж при шліфуванні. Це дозволить підвищити точність та продуктивність обробки порівняно із шліфуванням. Це також вказує на ефективність застосування на фінішних операціях обробки отворів сучасних технологій лезової обробки замість традиційних технологій шліфування.

Отже, ефективно обробку отвору розфрезуванням здійснювати в умовах високошвидкісного різання. Завдяки збільшенню кількості одночасно працюючих ріжучих лез фрези, це дозволить підвищити продуктивність і точність обробки порівняно з процесами розточування й внутрішнього шліфування й, тим більше, порівняно з процесом розсвердлювання отвору. Цим показано, що з точки зору підвищення продуктивності й точності методи механічної обробки отворів немірними інструментами (різцями, шліфувальними кругами, фрезами) характеризуються більше технологічних можливостей, ніж методи обробки мірними осьовими інструментами (свердлами, зенкерами, розгортками).

Таким чином, у роботі одержала подальший розвиток і поліпшення математична модель визначення величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі при механічній обробці, яка відрізняється від існуючих моделей тим, що узагальнює аналітичний опис пружного переміщення, виникаючого при шліфуванні та лезовій обробці. Це дозволило із єдиних позицій із урахуванням енергоємності обробки (умовного напруження різання  $\sigma$ ) виконати теоретичне порівняння величин пружного переміщення для різних технологій механічної обробки (точіння, шліфування, розточування, свердління й фрезування) та вибрати найбільш ефективні варіанти високоточної й високопродуктивної фінішної механічної обробки.

**Висновки.** 1. У роботі розроблено уточнену математичну модель визначення пружних переміщень, які виникають в технологічній системі при механічній обробці, в якій на відміну від існуючих моделей узагальнено аналітичний опис пружного переміщення при шліфуванні та лезовій обробці. Це дозволило встановити, що найменші пружні переміщення можна забезпечити при шліфуванні шляхом суттєвого перевищення швидкістю круга швидкості різання при лезовій обробці. Однак при цьому енергоємність обробки значно більше (до 10 разів), ніж при лезовій обробці, що обмежує технологічні можливості шліфування. Виходячи із цього, на фінішних операціях ефективно використовувати технології лезової обробки, особливо, технології високошвидкісного різання, які з кінематичної точки зору не поступаються шліфуванню та одночасно забезпечують зниження пружних переміщень, енергоємності та підвищення точності й продуктивності.

2. На основі розробленої математичної моделі управління пружними переміщеннями при механічній обробці показано, що з точки зору підвищення продуктивності та точності розміру обробки при точінні з відносно низькою жорсткістю технологічної системи доцільно зняття припуску здійснювати за один прохід інструменту або використовувати пружну схему шліфування з фіксуванням радіальним зусиллям. Для досягнення високої точності форми оброблюваної поверхні та підвищення продуктивності обробки необхідно зняття припуску здійснювати за схемами багатопрохідної обробки абразивними та лезовими інструментами.

3. Теоретично визначено умови підвищення точності обробки отворів при використанні мірних та немірних лезових інструментів, а також при шліфуванні. Показано, що при обробці отворів з нерівномірним припуском осьовими багатолезовими інструментами утворюються пружні переміщення, що знижують точність обробки. Тому обробку отворів в кілька проходів доцільно здійснювати свердлами з різними діаметрами, збільшуючи діаметр від проходу до проходу. Показано, що основним параметром, що визначає похибку обробки, є неспіввісність осьового інструменту й оброблюваного отвору. Теоретично встановлено, що при обробці отворів немірними інструментами, наприклад, при розточуванні, набагато простіше забезпечити необхідну точність, ніж при обробці осьовими інструментами. Для цього необхідно збільшувати швидкість різання й зменшувати подачу та глибину різання, а також застосовувати високоєфективні різальні інструменти з синтетичних надтвердих матеріалів. При розфрезуванні отворів можна досягти ще більшого підвищення точності їх обробки. Показано, що основною умовою високоточної обробки при внутрішньому шліфуванні є зниження енергоємності процесу різання шляхом зменшення інтенсивності тертя в зоні різання.

#### Список літератури:

1. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с.
2. Дитиненко С. А., Машко А. А. Определение технологических возможностей процесса выхаживания при шлифовании. Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2008. – Вип. 2 (17). – С. 119–124

3. Ковальчук О. М. Оптимізація структури і параметрів операцій шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одеса, 2008. – 21 с.
4. Колев К. С., Горчаков Л. М. Точность обработки и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
5. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
6. Лурье Г. Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
7. Маталин А. А. Технология машиностроения : учебник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
8. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
9. Новиков Ф. В., Рябенков І. О. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
10. Полянский В. И. Математическая модель управления упругими перемещениями при механической обработке. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2018. – № 27 (1303). – С. 105–110.
11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
12. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2004. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин". – 546 с.
13. Якимов А. В., Паршаков А. Н., Свиричев В. И., Ларшин В. П. Управление процессом шлифования. – Киев: Техніка, 1983. – 184 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Balakshin B. S. Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya. – М.: Mashinostroyeniye, 1969. – 359 s.
2. Ditinenko S. A., Mashko A. A. Opredeleniye tekhnologicheskikh vozmozhnostey protsessa vykhazhivaniya pri shlifovanii. Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ"ХПІ". – Харків, 2008. – Вип. 2 (17). – С. 119–124
3. Ковальчук О. М. Оптимізація структури і параметрів операцій шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одеса, 2008. – 21 с.
4. Kolev K. S., Gorchakov L. M. Tochnost' obrabotki i rezhimy rezaniya. – М.: Mashinostroyeniye, 1976. – 144 s.
5. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya. – L.: Mashinostroyeniye, 1984. – 103 s.
6. Lur'ye G. B. Shlifovaniye metallov. – М.: Mashinostroyeniye, 1969. – 197 s.
7. Matalin A. A. Tekhnologiya mashinostroyeniya : uchebnik. – L.: Mashinostroyeniye, 1985. – 496 s.
8. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki : monografiya. – Dnepr: LIRA, 2018. – 400 s.
9. Novikov F. V., Ryabenkov I. O. Teoretychni osnovy mekhanichnoy obrobky vysokotochnykh detaley : monografiya. – Kharkiv: Vyd. KHNEU, 2013. – 352 s.
10. Polyanskiy V. I. Matematicheskaya model' upravleniya uprugimi peremeshcheniyami pri mekhanicheskoy obrabotke. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. – 2018. – № 27 (1303). – S. 105–110.
11. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". – 580 s.
12. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. – Odessa: ONPU, 2004. – T. 7. "Tochnost' obrabotki detaley mashin". – 546 s.
13. Yakimov A. V., Parshakov A. N., Svirshchev V. I., Larshin V. P. Upravleniye protsessom shlifovaniya. – Kiyev: Tekhnika, 1983. – 184 s.

Поступила (received) 15.04.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasiliyivth)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua)  
ORCID: 0000-0001-6996-3356

**Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: [tools@imperija.com](mailto:tools@imperija.com), ORCID: 0000-0003-2841-9455

**СЕВИДОВА О.К., ШЕЛКОВОЙ О.М., РУДНЕВ О.В., ГУЦАЛЕНКО Ю.Г.**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ З ТВЕРДИМ ЗМАЩУВАННЯМ**

Досліджено вплив твердого змащування на процеси алмазного шліфування (АШ) та алмазно-іскрового шліфування (АІШ) важкооброблюваних матеріалів – твердого сплаву ВК6, титанового сплаву VT22 і жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23T3MP. Описано умови виконаних експериментальних досліджень. Оцінку проведено за показниками параметра шорсткості поверхні Ra та постконтактної температури Tpk. Встановлено, що використання твердого змащувального матеріалу (ТЗМ) на основі стеаринової кислоти (65%) та дисульфиду молибдену (35%) зменшує в 1,4...2,1 рази постконтактну температуру і шорсткість в 1,3...1,6 рази при алмазному шліфуванні сплаву VT22 і сталі 10X11H23T3MP. При АІШ характер впливу ТЗМ на Ra і Tpk не змінюється, але їх абсолютні значення збільшуються в 1,1...1,5 рази.

**Ключові слова:** твердий змащувальний матеріал, алмазне шліфування, алмазно-іскрове шліфування, важкооброблювані матеріали, постконтактна температура.

**СЕВИДОВА Е.К., ШЕЛКОВОЙ А.Н., РУДНЕВ А.В., ГУЦАЛЕНКО Ю.Г.**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК**

Исследовано влияние твёрдой смазки на процессы алмазного шлифования (АШ) и алмазно-искрового шлифования (АИШ) труднообрабатываемых материалов – твёрдого сплава ВК6, титанового сплава VT22 и жаропрочной нержавеющей стали 10X11H23T3MP. Оценка проведена по показателям параметра шероховатости поверхности Ra и постконтактной температуры Tpk. Установлено, что использование твёрдого смазочного материала (ТСМ) на основе стеариновой кислоты (65%) и дисульфида молибдена (35%) уменьшает в 1,4...2,1 раза постконтактную температуру и шероховатость в 1,3...1,6 раза при алмазном шлифовании сплава VT22 и стали 10X11H23T3MP. При АИШ характер воздействия ТСМ на Ra и Tpk не меняется, но их абсолютные значения увеличиваются в 1,1...1,5 раза. Наилучшие результаты при твёрдой смазке достигнуты на поверхности нержавеющей стали 10X11H23T3MP – Ra = 0,22...0,39 мкм и Ra = 0,38...0,49 мкм при АШ и АИШ соответственно.

**Ключевые слова:** твердый смазочный материал, алмазное шлифование, алмазно-искровое шлифование, труднообрабатываемые материалы, постконтактная температура.

**SEVIDOVA E.K., SHELKOVY A.N., RUDNEV A.V., GUTSALENKO YU.G.**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF TEMPERATURE OF DIAMOND GRINDING OF HEAVILY PROCESSED MATERIALS WITH SOLID LUBRICATION**

The influence of hard lubrication on the processes of diamond grinding (DG) and diamond spark grinding (DSG) of hard-working materials - hard alloy VK6, titanium alloy VT22 and heat-resistant stainless steel 10H11N23T3MP was studied. The conditions of the performed experimental researches are described. The evaluation was performed according to the parameters of the surface roughness parameter Ra of the postcontact temperature Tpk. It was found that the use of solid lubricants (SL) based on stearic acid (65%) and molybdenum disulfide (35%) reduces 1.4... 2.1 times post-contact temperature and roughness 1.3... 1.6 times with diamond grinding of alloy VT22 and steel 10X11H23T3MP. At DSG the character of influence of SL on Ra and Tpk does not change, but their absolute values increase in 1.1... 1.5 times.

**Key words:** solid lubricant, diamond grinding, diamond-spark grinding, roughness, difficult-to-process materials, post-contact temperature.

**1. Вступ.** Тверді змащувальні матеріали (ТЗМ) як різновид змащувально-охолоджувальних технологічних засобів (ЗОТЗ) почали використовувати для механічної обробки металів, зокрема шліфування, у 80-х роках 20 сторіччя [1 - 4]. Їх доцільність незаперечна у тих випадках, коли застосування традиційних ЗОТЗ ускладнено, не припустимо або не забезпечує технологічного ефекту. Але кожен оброблюваний матеріал потребує додаткових досліджень для вибору раціонального складу ТЗМ.

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз літературних даних [1 – 10], результатів попередніх власних досліджень показує, що на сьогодні не існує універсального складу ТЗМ, який забезпечує оптимальні показники обробки навіть для металів однієї групи. Марка матеріалу, параметри режиму шліфування, марка круга впливають на якість оброблюваної поверхні та теплові ефекти в зоні контакту. Кожен матеріал потребує додаткових досліджень для вибору раціонального складу ТЗМ. Лідером в розробці і використанні ТЗМ залишається авіакосмічна корпорація Boeing (США). Корпорація випускає мастила в широкому асортименті не тільки для своїх потреб, а й для інших споживачів.

**3. Мета дослідження.** Оцінка впливу твердого змащування на показники алмазного та алмазно-іскрового шліфування важкооброблюваних матеріалів – ВК6, VT22 і 10X11H23T3MP.

**4. Викладення основного матеріалу.** До суттєвих переваг твердого змащування порівняно з традиційними ЗОТЗ можна віднести економічність за рахунок оптимальної концентрації мінімальної кількості мастила в точно визначеному місці. Крім того, ТЗМ характеризуються екологічністю і зручністю нанесення на інструмент, не визивають корозії деталей та устаткування, не забруднюють робочі місця.

До складу ТЗМ зазвичай входять базові наповнювачі або зв'язки, антифрикційні, протизносні модифікатори та хімічно-активні компоненти [5 - 10], які знижують сили різання, тертя та температуру в зоні обробки, що сприяє покращенню показників процесу шліфування. Подальший розвиток і розширення практичного впровадження твердого змащування для металообробки пов'язаний саме з розробкою і дослідженням нових видів твердих мастил.

Застосовувалися наступні умови проведення експериментальних досліджень.

При проведенні експериментів були вибрані представники з 3-х груп важкооброблюваних матеріалів. Перший – це твердий сплав ВК6, який використовують для виготовлення ріжучих пластин усіх видів лезової обробки.

Із титанових сплавів для експериментів було вибрано сплав ВТ22 (**Fe** – 0,5 - 1,5%, **C** – до 0,1%, **Si** – до 0,15%, **Cr** – 0,5 – 2%, **Mo** – 4 - 5,5%, **V** – 4 - 5,5%, **N** – до 0,05%, **Al** – 4,4 - 5,9%, **Zr** – до 0,3%, **O** – до 0,2%, **H** – до 0,015%, **Ti** – 78,485 - 86,6%).

Сплав ВТ22 використовують для виготовлення силових деталей і зварних вузлів планерів (силові балки, лонжерони, шпангоути, вузли агрегатів, нервюри, рельси закрилків і передкрилків), силові деталі і вузли шасі (підкоси, коромисло візка, шліц-шарніри, гальмівні важелі). Унікальні властивості цього матеріалу дозволяють виготовляти елементи шасі. Доля деталей із сплаву ВТ22 в конструкціям шасі складає ~30% [11].

До недоліків титанових матеріалів відносять важку оброблюваність різанням, зокрема шліфуванням, через схильність до налипання, низьку теплопровідність і поганих антифрикційних властивостей [12].

Представником третьої групи важкооброблюваних матеріалів була вибрана дисперсійно твердіюча сталь 10X11H23T3MP. Склад: **C** – до 0,1%, **Cr** – 10 – 15%, **Ni** – 21 – 25%, **Ti** – 2,6 – 3,2%, **Mo** – 1 – 1,6%, **Si** – до 0,6%, **Mn** – до 0,6%, **Al** – до 0,8%, **S** – до 0,01%, **B** – до 0,02%, **P** – до 0,025%, **Fe** ~ 59%.

Сталь використовують для виготовлення деталей, які експлуатуються за підвищених температур в агресивних середовищах. Це можуть бути лопатки, деталі для турбін, диски, пружини.

Механічну обробку здійснювали за двома методами шліфування – алмазного (АШ) і алмазно-іскрового, розробленого в НТУ «ХП».

Експериментальні дослідження проводили на базі універсально-заточувального верстата моделі ЗД642Е, модернізованого для алмазно-іскрового шліфування (рис. 1).



Рис. 1 – Модернізований універсально-заточний верстат мод. ЗД642Е

В умовах АШ використовували алмазні круги з металевою зв'язкою: АС6 50/40 100% М1-01. Класичне алмазне шліфування здійснювали кругами з бакелітовою зв'язкою: АС4 50/40 100% В1-01.

Рациональний склад ТЗМ шукали з урахуванням літературних даних та результатів власних попередніх дослідів [13 - 16]. Зокрема, за базову основу була взята стеаринова кислота, яка відноситься до класу вищих насичених жирних кислот. Оскільки її молекула полярна, то сама по собі кислота є поверхнево-активною речовиною і може самостійно виконувати змащувальну функцію на ювенильній поверхні оброблюваного металу. Плівка кислоти, що утворюється в результаті хімічної адсорбції відноситься до типових прикладів граничного змащування. Окрім самостійної змащувальної функції в інших відомих складах ТЗМ стеаринова кислота виконує роль зв'язуючої речовини для класичних твердих мастил (змащувачів) – дисульфиду молібдену, графіту, гексагональному нітриду бору і т.п. Ці дані були враховані при розробці експериментальних складів ТЗМ.

Складові інгредієнти ТЗМ зважували на технічних вагах АХІS ВТУ-210 і змішували в скляній ємності. Суміш розтоплювали на водяній бані і перемішували до однорідної субстанції, яку виливали в спеціально розроблену форму для виливок. Після охолодження на повітрі до кімнатної температури зразки ТЗМ товкачем виштовхували з форми.

На робочу поверхню шліфувального круга ТЗМ наносили через два подвійні ходи на третьому без зміни його швидкості.

Одним з головних показників дії будь-яких ЗОТЗ є температура в зоні контакту. Її зниження в усіх процесах різання, зокрема, шліфуванні, сприятливо позначається на якості обробленої поверхні – зменшуються залишкові напруження поверхневого шару і його товщина, зникають припали. Одночасно покращуються умови для експлуатації шліфувального круга, збільшується його зносостійкість.

Основною функцією ТЗМ є змащувальна, а не охолоджувальна дія. В той же час ефективно змащування призводить до зменшення сил різання і тертя в зоні контакту, що, в свою чергу, проявляється зменшенням генерованого тепла. Таким чином, за температурним показником можна оцінювати вплив ТЗМ на шліфувальний

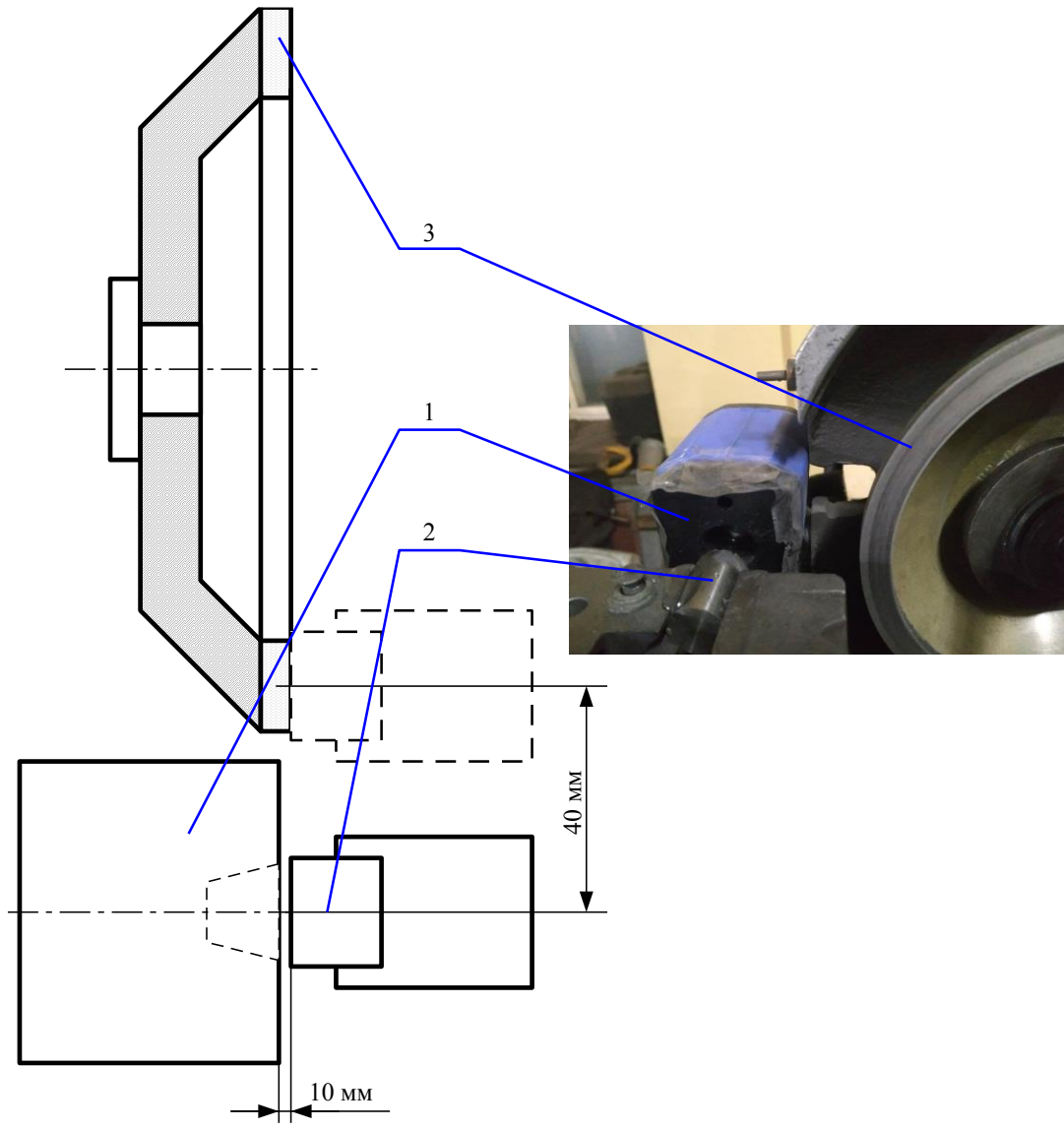


процес в цілому.

Вимірювання температури в зоні обробки при шліфуванні методично ускладнене і зазвичай реалізується через штучні термодари, кінці яких виводять в площину шліфування [17].

Нами було зроблено припущення, що дію ТЗМ можна якісно оцінювати за постконтактною температурою  $T_{пк}$  поверхні деталі (зразка) на її виході із зони контакту з кругом.

Температуру поверхні вимірювали безконтактним способом за допомогою інфрачервоного пірметра Flus IR-833, жорстко закріпленого на кронштейні верстата на відстані 10-15 мм від площини зразка (рис. 2).



1 – пірметр; 2 – зразок (деталь); 3 – шліфувальний круг

Рис. 2 – Схема вимірювання постконтактної температури

Якість шліфованої поверхні оцінювали показником шорсткості  $R_a$  і дослідженням її стану на предмет наявності дефектів – тріщин, припалів і т.п.

Аналіз результатів досліджень (рис. 3 – 5) показує, що використання ТЗМ (СтК 65% +  $MoS_2$  35%) неоднозначно впливає на показники процесу шліфування, а залежить від матеріалів і режимів обробки.

За малої поперечної подачі (0,005 мм/подв. хід) чинник постконтактної температури від дії ТЗМ майже нівелюється на всіх важкооброблюваних металах. Це можна пояснити, перш за все, мінімальним тепловиділенням при цьому режимі, а по-друге – наступним відносно швидким охолодженням поверхні на повітрі. Даний ефект особливо характерний для найбільш теплопровідного матеріалу – ВК6  $\left( \lambda \approx 60 \frac{Вт}{м \cdot К} \right)$  і зберігається на ньому при збільшенні подачі до 0,01 мм/подв.хід.



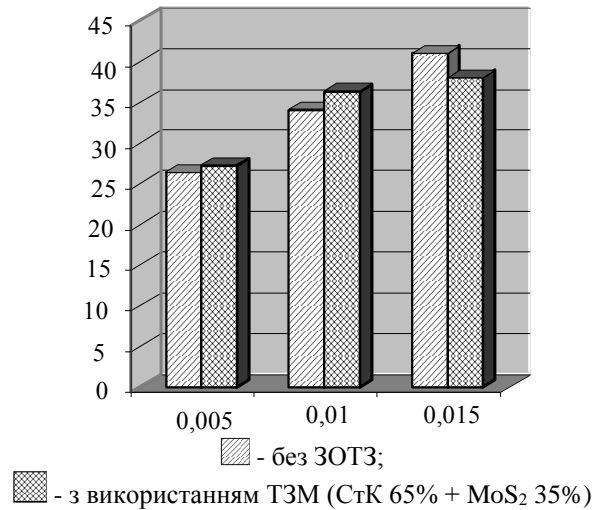


Рис. 3 – Температура шліфування при обробці твердого сплаву ВК6 методом алмазного шліфування

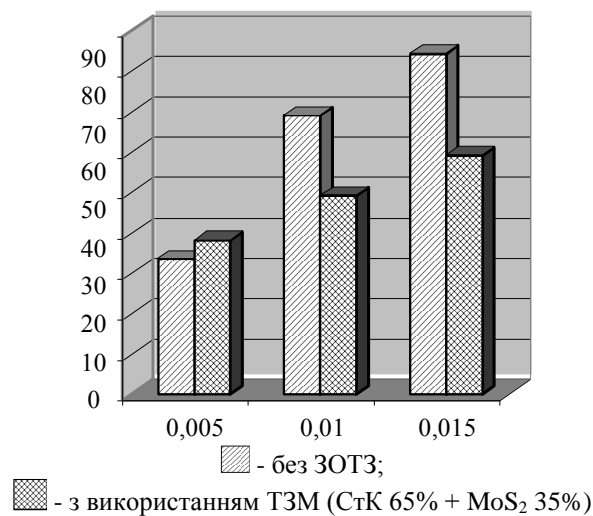


Рис. 4 – Температура шліфування при обробці титанового сплаву ВТ22 методом алмазного шліфування

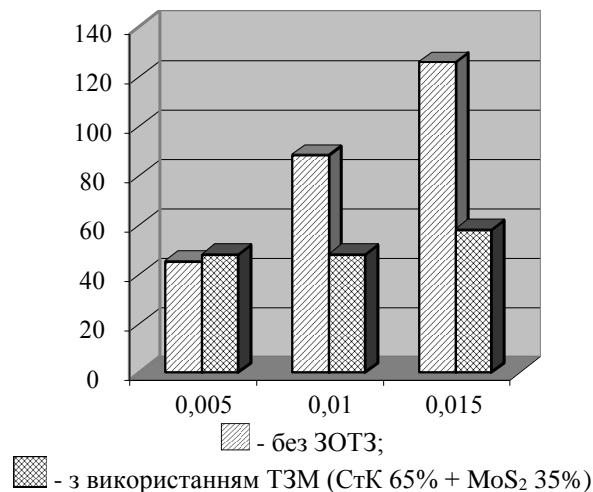


Рис. 5 – Температура шліфування при обробці сталі 10X11H23T3MP методом алмазного шліфування

Найбільш суттєво ТЗМ зменшує тепловиділення в зоні шліфування, а, відповідно і пост-контактну температуру, при обробці титанового сплаву ВТ22 і сталі 10X11H23T3MP – матеріалів з низькою теплопровідністю  $\lambda \approx 22...12 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  відповідно, схильних до налипання і наволікання на інструмент [18]. Комбінація саме цих чинників призводить до генерації високих контактних температур в зоні різання. При збільшенні подачі до 0,01 і 0,015 мм/подв.хід значення

$T_n$  зменшується в 1,4...2,1 рази порівняно з процесом без змащування.

Режим алмазно-іскрового шліфування (рис. 6 – 8) практично не змінює характер впливу ТЗМ на показники процесу на всіх оброблюваних матеріалах. При цьому слід зазначити, що величини контрольованої температури оброблюваних поверхонь в умовах АІШ, як без змащування, так і з використанням ТЗМ, мають більші абсолютні значення, ніж при класичному алмазному шліфуванні. Їх різниця зростає від 3...6° на сплаві ВК6 до 8...40° на сталі 10Х11Н2ЗТЗМР.

Факт збільшення температури в зоні шліфування, а, відповідно, її значення на виході із контакту, можна пояснити введенням додаткової енергії електричного імпульсу за умов АІШ [19].

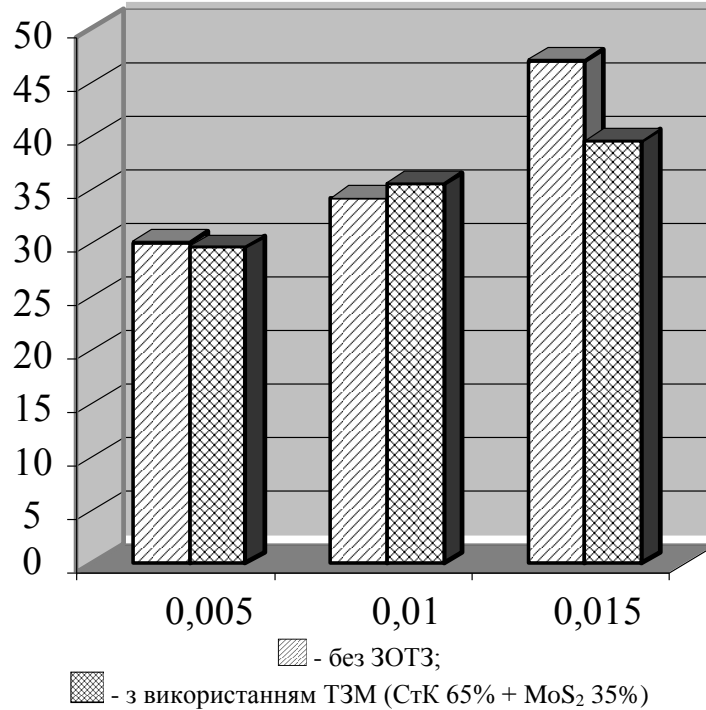


Рис. 6 – Температура шліфування при обробці твердого сплаву ВК6 методом алмазно-іскрового шліфування

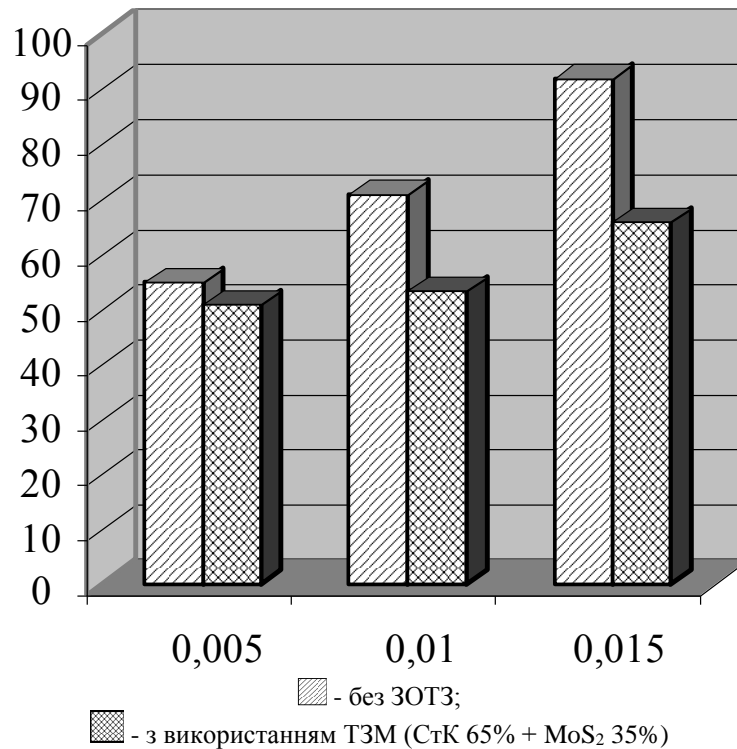


Рис. 7 – Температура шліфування при обробці титанового сплаву ВТ22 методом алмазно-іскрового шліфування

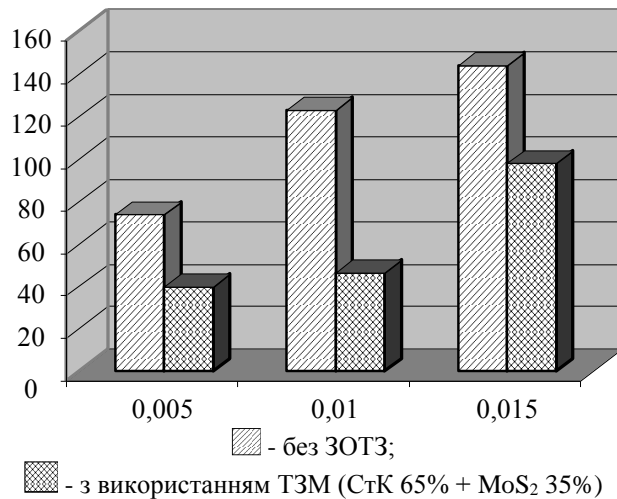


Рис. 8 – Температура шліфування при обробці сталі 10X11H23T3MP методом алмазно-іскрового шліфування

**Висновки.** Застосування ТЗМ на основі стеаринової кислоти (65%) і дисульфиду молібдену (35%) неоднозначно впливає на показники алмазного шліфування ВК6, ВТ22 і 10X11H23T3MP в залежності від хімічного складу оброблюваного матеріалу та режимів обробки.

В умовах алмазно-іскрового шліфування характер впливу ТЗМ на показники шорсткості і постконтактної температури майже не змінюються, але їх абсолютні значення збільшуються в 1,1...1,5 рази.

Інформативність показника  $T_{pk}$  зростає при обробці металів з низькою теплопровідністю. Його можна ефективно застосовувати на етапі первинних досліджень по вибору раціональних складів ТЗМ для шліфування таких матеріалів.

Найкращі результати від використання ТЗМ – мінімальна шорсткість поверхні і максимальне зниження постконтактної температури – досягнуті при шліфуванні жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23T3MP, що є підставою вважати цей склад твердого мастила перспективним для обробки схожих матеріалів.

#### Список літератури:

- Лысаков В.С., Рибоков В.А., Кремь З.И. и др. Применение твёрдых смазочных материалов при заточке инструмента кругами из эльбора: методические рекомендации / Узуня М.Д., Нилов И.М., Агу Коллінз Агу; власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № 10 2010 11928; заявл. 08.10.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. №6.
- Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера — М.: Машиностроение, 1986. 352 с, ил.
- Рутман П.А., Лобанова В.С. Использование твёрдых смазок с легкоплавкими металлическими наполнителями при обработке металлов резанием // Смазочно - охлаждающие технологические средства в процессах абразивной обработки. Теоретические основы и техника применения: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УлПИ, 1988. - С. 112 – 117.
- Безъязычный В.Ф., Лобанов А.В., Рудин Ю.А. Эффективность применения твёрдых смазочных композиций при обработке лопаток ГТД // Вестник машиностроения. 1994. № 3. С. 32 – 34.
- Пат 58078 Україна, МПК (2011.01) В24В 1/10. Твердый змащувальний матеріал для комбінованої обробки матеріалів струмопровідним абразивним інструментом / Узуня М.Д., Нилов И.М., Агу Коллінз Агу; власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № 10 2010 11928; заявл. 08.10.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. №6.
- Патент РФ № 96117774 Твердая смазка для абразивной обработки металлов / Булатов М.А., Кононенко В.И., Лундина В.Г., Курникова Л.И., Алехина В.Д., Шевченко В.Г., Швейкин Г.П., Нохрин А.С. – заявл. 04.09.1996, опубл. 20.11.1998.
- Патент РФ № 2525293 Твердая смазка для абразивной обработки металлов и сплавов / Торокин В.В., Алехина В.Д., Шевченко В.Г., Рябина А.В. – заявл. 14.03.2014, опубл. 10.08.2014.
- Патент РФ № 96120057 Твердая смазка для абразивной обработки сталей и твёрдых сплавов (ее варианты) и антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твёрдых сплавов / Стариков С.В., Прушак В.Я., Богданович П.Н. – заявл. 03.10.1996, опубл. 27.06.1997.
- Кремнев Г.П., Наддачин В.Б., Якимов А.В., Винникова В.И., Яровой Ю.В. Новые составы твёрдых смазок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов. // Вісник інженерної академії України. Київ, – 2001. – №3. С. 351...353.
- Ларшин В.П., Гречиха А.А., Якимов А.В. Применение твёрдых технологических смазок при шлифовании вырубных штампов // Вісник інженерної академії України. - 2001. - №3. - С.354 - 358.
- Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Преимущества и применение высокопрочных титановых сплавов и перспективные направления при разработке новых // Вестник машиностроения. - 2018. - № 7. - С. 68-71. - (Технология машиностроения). - Библиогр.: с. 71 (21 назв.). - ISSN 0042-4633
- Киселев Е. С. Влияние условий шлифования на свойства поверхностного слоя заготовок из титановых сплавов / Е. С. Киселев, Ж. К. Джавахия, А. Б. Маркелов // Станки и инструмент. 1988. - № 5. С. 30 - 31.
- Агу Коллінз Агу Шлифование твёрдых сплавов с применением технологии минимальной смазки: монография / Агу Коллінз Агу, Узуня М.Д., Руднев О.В. – Х. : НТУ «ХПИ», 2019. – 188 с.
- Стариков С.В., Прушак В.Я., Богданович П.Н. Твердая смазка для абразивной обработки сталей и твердых сплавов (ее варианты) и антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов: патент РФ № 96120057, заявл. 03.10.1996, опубл. 27.06.1997.
- Булатов М.А., Кононенко В.И., Лундина В.Г., Курникова Л.И., Алехина В.Д., Шевченко В.Г., Швейкин Г.П., Нохрин А.С. Твердая смазка для абразивной обработки металлов: патент РФ № 96117774, заявл. 04.09.1996, опубл. 20.11.1998.
- Кононенко В.И., Алехина В.Д., Байдалин Ю.А., Рябина А.В., Торокин В.В., Шевченко В.Г. Твердая смазка для абразивной обработки материалов: патент РФ № 2005134068, заявл. 03.11.2005, опубл. 10.05.2007.
- Панайоти В.А. Исследование теплового режима при шлифовании с применением твердых смазок / Вестник Брянского государственного технического университета, №6(59), 2017, С. 32 –38.
- Худобин Л.В., Худобин И.И. Шлифование заготовок из титановых сплавов и сталей с применением технологических гидкостей //

19. Кобзарь Л.Е., Фадеев В.А., Беззубенко Н.К. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование. - Харьков : ХГПУ - ХНПО «ФЭД», 1995. - 152 с.

**List of references:**

1. V.S. Lysakov, V.A. Rybakov, Z.Y. Kremen. and others. Application of solid lubricants when sharpening tools with elbor wheels: methodical recommendations M.: NIIMash, 1981. – 43 p.
2. Entelis S.G., Berliner E.M. Lubricating and cooling technological means for cutting metals: Handbook / Ed. S.G. Entelisa, E.M. Berlinera — M.: Mashinostroenie, 1986. 352 p., illustrations.
3. Rutman P.A., Lobantsova V.S. The use of solid lubricants with low-melting metal fillers during metal cutting // Lubricating and cooling technological means in the processes of abrasive processing. Theoretical foundations and application techniques: Collection of scientific works. – Ulyanovsk: UIPI, 1988. - P. 112 – 117.
4. Bezyazychnyy V.F., Lobanov A.V., Rudyn Yu.A. Effectiveness of the use of solid lubricant compositions in the processing of blades of a gas turbine engine // Vestnyk mashinostroeniya. 1994. No. 3. P. 32-34.
5. Pat 58078 Ukraine, IPC (2011.01) B24B 1/10. Solid lubricant for combined processing of materials with a conductive abrasive tool / M.D. Uzunyan, I.M. Pyzhov, Agu Collins Agu; owner National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – No. and 2010 11928; statement 08.10.2010; published 25.03.2011. Bul. No. 6.
6. Patent of the Russian Federation No. 96117774 Solid lubricant for abrasive processing of metals / Bulatov M.A., Kononenko V.Y., Lundina V.G., Kurnikova L.Y., Alyokhina V.D., Shevchenko V.G., Shveykin G. P., Nokhryn A.S. - statement 09/04/1996, publ. 20.11.1998.
7. Patent of the Russian Federation No. 2525293 Solid lubricant for abrasive processing of metals and alloys / Torokin V.V., Alyokhina V.D., Shevchenko V.G. Ryabina A.V. - statement 14.03.2014, publ. 10.08.2014.
8. Patent of the Russian Federation No. 96120057 Solid lubricant for abrasive processing of steels and hard alloys (its variants) and anti-stick additive to lubricants for abrasive processing of steels and hard alloys / S.V. Starykov, V.Ya. Prushak, P.N. Bogdanovich. - statement 03.10.1996, publ. 27.06.1997.
9. Kremnev G.P., Naddachyn V.B., Yakimov A.V., Vinnikova V.I., Yarovoi Yu.V. New compositions of solid lubricants for blade and abrasive processing of hard-to-process materials. // Bulletins of the Engineering Academy of Ukraine. Kyiv, - 2001. - No. 3. P. 351...353.
10. Larshin V.P., Grechikha A.A., Yakimov A.V. The use of solid technological lubricants in the grinding of punches // Herald of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2001. - No. 3. - P.354 - 358.
11. Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A. Advantages and application of high-strength titanium alloys and promising directions in the development of new ones // Vestnyk mashinostroeniya. - 2018. - No. 7. - P. 68-71. - (Engineering Technology). - Bibliogr.: p. 71 (21 titles) . - ISSN 0042-4633
12. E. S. Kiselev Influence of grinding conditions on the properties of the surface layer of workpieces from titanium alloys / E. S. Kiselev, Zh. K. Javakhia, A. B. Markelov // Machine tools and tools. 1988. - No. 5. P. 30 - 31.
13. Agu Collins Agu Grinding of solid alloys using minimal lubrication technology: monograph / Agu Collins Agu, Uzunyan M.D., Rudnev O.V. - Kh.: NTU "KhPI", 2019. - 188 p.
14. Starykov S.V., Prushak V.Ya., Bogdanovich P.N. Solid lubricant for abrasive treatment of steels and hard alloys (its variants) and anti-stick additive to lubricants for abrasive treatment of steels and hard alloys: RF patent No. 96120057, application. 03.10.1996, publ. 27.06.1997.
15. Bulatov M.A., Kononenko V.Y., Lundina V.G., Kurnikova L.I., Alekhina V.D., Shevchenko V.G., Shveikin G.P., Nokhrin A.S. Solid lubricant for abrasive processing of metals: RF patent No. 96117774, application. 09/04/1996, publ. 20.11.1998.
16. V.Y. Kononenko, V.D. Alekhina, Yu.A. Baidalyn, A.V. Ryabina, V.V. Torokin, and V.G. Shevchenko. Solid lubricant for abrasive processing of materials: RF patent No. 2005134068, application. 03.11.2005, publ. 10.05.2007.
17. Panayota V.A. Investigation of the thermal regime when grinding with solid lubricants / Bulletin of the Bryansk State Technical University, No. 6(59), 2017, pp. 32-38.
18. Khudobyn L.V., Khudobyn I.L. Grinding of workpieces from titanium alloys and steels with the use of technological viscosity // Vestnik mashinostroeniya. 1982. - No. 11. - P. 40-43.
19. Kobzar L.E., Fadeev V.A., Bezsubenko N.K. Progressive diamond spark grinding. - Kharkiv: KhHPU - KhNPO "FED", 1995. - 152 pp.

*Поступила (received) 20.02.2022*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Севидова Олена Костянтинівна (Севидова Елена Константиновна, Elena Sevidova)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID 0000-0001-8762-6230; тел.: (057) 7076143; e-mail: [hightech@kpi.kharkov.ua](mailto:hightech@kpi.kharkov.ua).

**Шелковий Олександр Миколайович (Шелковой Александр Николаевич, Shelkovyi Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7414-4854; тел.: (057) 7076143 e-mail: [alnikshelk@gmail.com](mailto:alnikshelk@gmail.com)

**Руднев Олександр Віталійович (Руднев Александр Витальевич, Aleksandr Rudnev)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4091-6748; тел.: (057) 7076143; e-mail: [aleksandr1827.64@gmail.com](mailto:aleksandr1827.64@gmail.com).

**Гуцаленко Юрій Григорійович (Гуцаленко Юрий Григорьевич, Yuriy Gutsalenko)** – старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4701-6504; тел.: (057) 7076143; e-mail: [yu.gutsalenko@gmail.com](mailto:yu.gutsalenko@gmail.com).

**ТАРЕЛЬНИК В.Б., ПИРОГОВ В.О.**

## **ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВАЛІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ.**

В статті проведений аналіз літературних джерел, який показав, що в останні роки появились нові технологічні методи зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів. Вони основані на використанні екологічно безпечного методу електроіскрового легування (ЕІЛ) (цементация, нанесення комбінованих покриттів з дисульфідом молібдену ( $\text{MoS}_2$ ), покриттів складу Al-C-B) і без проведення порівняльних випробувань на зносостійкість важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.

Дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що ваговий знос круглих зразків зі шліфованої сталі 40X, контактуючих в умовах змащення турбінним маслом Т-22 з бабітовими вкладишами підшипників ковзання (ПК) по схемі «диск-вкладыш», в 1,15 рази більший чим зі сталі 30X13 і, відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після цементации методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) + безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО) і ЕІЛ (Мо+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і, відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після ЦЕІЛ + БУФО і ЕІЛ (Мо+S) + БУФО. При цьому був визначений найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030, який належить покриттям з  $\text{MoS}_2$ , сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.

Аналіз характеру зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як зміцнених, так і не зміцнених, показав, що у всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється, стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність. Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕІЛ (Мо+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.

Ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контртелом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ складу (Al-C-B) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7 %; і зі сталі 30X13 з аналогічною обробкою ЕІЛ (Al-C-B) + БУФО, відповідно на 98,0 і 71,8 %.

**Ключові слова:** відцентровий насос, шийки валів, підшипник ковзання, електроіскрове легування, безабразивна ультразвукова фінішна обробка, знос, машина тертя.

**TARELNYK V.B., PIROGOV V.O.**

## **INCREASING THE DURABILITY OF CENTRIFUGAL PUMP SHAFTS BY COMBINED METHODS.**

The article analyzes the literature, which showed that in recent years there have been new technological methods of strengthening the surface layers of the centrifugal pumps shafts necks. They are based on the use of environmentally friendly method of electrospark alloying (ESA) (cementation, application of combined coatings with molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ), coatings of Al-C-B) and without comparative tests for wear resistance is difficult to prefer one method or another. Studies on the friction machine СМЦ-2 found that the weight wear of round specimens of polished steel 40X, in contact with lubrication of turbine oil Т-22 with babbitt inserts of the sliding bearing according to the scheme "disk-insert", 1.15 times greater than steel 30X13 and, respectively, 2.50 and 4.41 times than 40X steel after cementation by ESA (CESA) + non-abrasive ultrasonic finishing (NAUF) and ESA (Mo + S) + NAUF. In turn, the linear wear of polished steel 40X round samples is greater than steel 30X13 1.09 times and, respectively, 2.83 and 5.85 times than steel 40X after CESA + NAUF and ESA (Mo + S) + NAUF. The lowest coefficient of friction was recognized as 0.025 and 0.030, which belongs to the coating of  $\text{MoS}_2$ , formed, respectively, on samples of steel 30X13 and 40X and treated with NAUF.

Analysis of the linear wear change nature of steel 40X and 30X13 round samples, both hardened and not hardened, showed that all samples first have more intense wear, which after 2 hours of abrasion slows down, becomes more stable and at first glance resembles exponential dependence. Samples reinforced in the sequence ESA (Mo + S) + NAUF have the best wear resistance, the wear of which after 8 h of tests is 0.9 and 1.1  $\mu\text{m}$ , respectively, of steel 30X13 and 40X.

Weight and linear wear of 40X steel specimens without hardening is higher compared to non-reinforced 30X13 steel specimens tested in pair with BK8 counterbody under conditions of abundant lubrication with I40A industrial oil, by 21.7 and 14.2%, respectively; in comparison with samples of 40X steel with a coating applied by the method of ESA composition (Al-C-B) followed by NAUF, respectively, 77.8 and 84.7%; and 30X13 steel with similar treatment of ESA (Al-C-B) + NAUF, 98.0 and 71.8%, respectively.

**Key words:** centrifugal pump, shaft necks, plain bearing, electrospark alloying, non-abrasive ultrasonic finishing, wear, friction machine.

**ТАРЕЛЬНИК В.Б., ПИРОГОВ В.А.**

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОВ ПРОЦЕНТРОВЫХ НАСОСОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ**

В статье проведен анализ литературных источников, показавший, что в последние годы появились новые технологические методы укрепления поверхностных слоев шеек валов центробежных насосов. Они основаны на использовании экологически безопасного метода электроискрового легирования (ЭИЛ) (цементация, нанесение комбинированных покрытий с дисульфидом молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), покрытий состава Al-C-B) и без проведения сравнительных испытаний на износостойкость трудно отдать предпочтение тому или иному методу.

Исследованиями на машине трения СМЦ-2 установлено, что весовой износ круглых образцов из шлифованной стали 40X, контактирующих в условиях смазки турбинным маслом Т-22 с баббитовыми вкладышами ПК по схеме «диск-вкладыш», в 1,15 раза больше чем из стали 30X и, соответственно, в 2,50 и 4,41 раза чем стали 40X после цементации методом ЭИЛ (ЦЭИЛ) + безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО) и ЭИЛ (Мо+S) + БУФО. В свою очередь линейный износ круглых образцов шлифованной стали 40X больше чем стали 30X13 в 1,09 раза и, соответственно в 2,83 и 5,85 раза чем стали 40X после ЦЭИЛ+БУФО и ЭИЛ(Мо+S)+БУФО. При этом был признан наименьший коэффициент трения 0,025 и 0,030, принадлежащий покрытиям из  $\text{MoS}_2$ , сформированным, соответственно, на образцах из стали 30X13 и 40X и обработанным БУФО.

Анализ характера изменения линейного износа круглых образцов из стали 40X и 30X13, как упрочненных, так и не упрочненных, показал, что у всех образцов сначала происходит более интенсивный износ, который после 2-х часов стирання замедляется, становится более стабильным и в первом приближении напоминает экспоненциальную зависимость. Наилучшей износостойкостью обладают образцы, укрепленные в последовательности ЭИЛ (Мо+S) + БУФО, износ которых после 8 ч экзаменов составляет 0,9 и 1,1 мкм, соответственно из стали 30X13 и 40X.

Весовой и линейный износ образцов из стали 40X без укрепления больше по сравнению с неукрепленными образцами из стали 30X13, которые испытывались в паре с контртелом из твердого сплава ВК8 в условиях обильного смазки индустриальной смазкой І40А, соответственно на 21,7 и 14,2%; по сравнению с образцами из стали 40X с покрытием, нанесенным методом ЭИЛ состава (Al-C-B) с последующей БУФО, соответственно на 77,8 и 84,7 %; и из стали 30X13 с аналогичной обработкой ЭИЛ (Al-C-B) + БУФО соответственно

**Ключевые слова:** центробежный насос, шейки валов, подшипник скольжения, электроискровое легирование, безабразивная ультразвуковая финишная обработка, износ, машина трения.

**Вступ. Постановка проблеми.** Сучасний розвиток техніки супроводжується підвищенням режимів роботи машин та механізмів, які нерідко працюють при високих швидкостях, навантаженнях та температурах, а також за умов корозійного, абразивного та інших видів впливу робочих середовищ.

Розвиток техніки досі йде в основному шляхом, зумовленим винаходом колеса. Особливої досконалості досягли цьому шляху роторні машини і механізми, діапазон параметрів яких вражає уяву [1].

Частота обертання роторів ультрацентрифуг, мікротурбін, турбодетандер досягає мільйона в хвилину [2]; потужність турбонасосних агрегатів двигунів ракет-носіїв за мінімальних габаритів перевищують сотню мегават [3]; маси роторів парових та гідравлічних турбін потужністю 500-1200 МВт вимірюються сотнями тон.

Поверхня шипа ротора має велику окружну швидкість відносно вкладиша підшипника, і для зниження до допустимих меж втрат потужності на тертя зазор між ними повинен бути заповнений стійкою плівкою рідкої або газової мастила. Мастильний шар повинен не тільки знижувати тертя, але й сприймати великі статичні та динамічні навантаження, ефективно демпфувати коливання шипа. Завдання створення опорних вузлів, що володіють необхідною несучою та демпфуючою здатністю, довговічністю та надійністю надзвичайно.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Основними елементами валів роторів відцентрових насосів, які підлягають різним видам зносу і впливу оточуючого середовища є шийки під підшипники ковзання (ПК), а також посадочні шийки (ПШ) під підшипники котіння, робочі колеса, шківни, захисні втулки, напівмуфти і таке інше.

Розробка та впровадження ефективних технологій поверхневого зміцнення обумовлена, з одного боку, необхідністю економії дорогих легуючих елементів, а з іншого – посиленням умов експлуатації деталей. Одним із способів вирішення цього завдання є застосування технологій, що використовують для обробки матеріалу концентровані потоки енергії (КПЕ): плазмове напилення [4] та плазмове обробка [5], лазерна обробка [6, 7]. У нерівноважних умовах нагріву та охолодження при обробці КПЕ відбувається формування принципово іншої, ніж при традиційних методах термічного та механічного впливу, структури поверхневого шару.

До сучасних методів поверхневої обробки металевих поверхонь КПЕ належить електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними властивостями на нанорівні [8].

Порівняно з традиційними технологіями поверхневого зміцнення метод ЕІЛ має переваги: локальність, високий ступінь адгезії, виникнення невеликого теплового фону і, як наслідок, відсутність викривлень та деформацій, простий та гнучкий технологічний процес, екологічна безпека та ін. [9].

Шийки валів ПК повинні мати зносостійку робочу поверхню і в'язку серцевину. Таку властивість поверхневого шару отримують методом ХТО – цементацією [10-12]. В останні роки велику популярність у технологів, що займаються зміцненням поверхневих шарів деталей з метою захисту від зношування набув метод цементації, який виконують електроіскровим легуванням графітовим електродом-інструментом (Ц<sub>ЕІЛ</sub>) [10-12].

Нами в [13-15] досліджувався процес Ц<sub>ЕІЛ</sub> сталевих поверхонь, який має низку переваг у порівнянні з традиційним, здійснюваним методом ХТО. Основними перевагами Ц<sub>ЕІЛ</sub> є: досягнення 100% суцільності зміцнення поверхні; підвищення твердості поверхневого шару деталі за рахунок дифузійно-загартованих процесів; можливість локальної обробки (легування можна здійснювати в строго зазначених місцях, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі) та ін. При Ц<sub>ЕІЛ</sub> використовується енергія розряду 0,036 – 6,8 Дж та продуктивність 0,5-3,0 см<sup>2</sup>/хв.

Під час ЕІЛ графітовим електродом зміцнення поверхні деталі відбувається за рахунок дифузійно-гартівних процесів, які полягають в локальному насиченні її вуглецем при досить високій температурі (до 10 000°C) з наступним швидким охолодженням до кімнатної температури. ЕІЛ графітовим електродом можна виділити в окремих напрямках, що дозволяє формувати на деталях машин поверхневі шари підвищеної зносостійкості без зміни вихідного розміру деталі.

При цементації сталевих деталей методом ЕІЛ товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу легування (продуктивності процесу). Зі збільшенням енергії розряду і часу легування товщина зміцненого шару збільшується. Але при цьому зростає шорсткість поверхні. Так, при Ц<sub>ЕІЛ</sub> середньовуглецевої легованої сталі 40Х (Ra=0,5 мкм) з продуктивністю 0,2 см<sup>2</sup>/хв. при енергії розряду W<sub>p</sub> = 6,8 Дж товщина шару підвищеної твердості становить понад 1,15 мм. Шорсткість поверхні при цьому відповідає Ra = 11,7-14,0 мкм [16].

Відомий спосіб [17], який використовують для зниження шорсткості поверхні деталей машин і, отже, для розширення галузі їх застосування. Даний спосіб полягає в тому, що Ц<sub>ЕІЛ</sub> проводять поетапно, знижуючи на кожному етапі енергію розряду. При цьому використовують енергію розряду W<sub>p</sub> = 0,1-6,8 Дж і продуктивність 0,04-2,0 см<sup>2</sup>/хв. Незважаючи на наведені вище позитивні якості, даний спосіб має ряд недоліків: зниження, в результаті відпалу, властивостей мікротвердості і товщини зміцненого поверхневого шару при поетапному впливі на нього електричного розряду при Ц<sub>ЕІЛ</sub>; значна тривалість процесу при поетапному Ц<sub>ЕІЛ</sub>, що застосовується для зниження шорсткості.

Запропонований нами новий спосіб [18] може бути використаний для Ц<sub>ЕІЛ</sub> сталевих валів відцентрових насосів. В основу способу було поставлено задачу підвищення параметрів якості поверхневих шарів сталевих деталей, сформованих методом Ц<sub>ЕІЛ</sub>: зниження їх шорсткості, підвищення товщини, мікротвердості і суцільності. Поставлену задачу вирішують тим, що у новому способі цементацію проводять у три етапи:

- на першому етапі виконують Ц<sub>ЕІЛ</sub> поверхні сталеві деталі з енергією розряду і продуктивністю в залежності від заданих показників товщини зміцненого шару, шорсткості його поверхні і суцільності;
- на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі, ретельно втираючи, наносять порошок графіту;
- на третьому етапі проводять Ц<sub>ЕІЛ</sub> сформованої на другому етапі поверхні, причому Ц<sub>ЕІЛ</sub> на третьому етапі виконують з тією ж енергією розряду і продуктивністю, що і на першому етапі.

Порошок графіту наносять у вигляді суспензії, що включає 80 % порошку графіту і 20 % вазеліну. Цементацию на третьому етапі виконують, не чекаючи висихання суспензії з енергією розряду  $W_p = 0,9 - 4,6$  Дж і продуктивністю  $1,0-2,0 \text{ см}^2/\text{хв}$ .

Слід відмітити, що на другому етапі западини між виступами шорсткості заповнюються порошком графіту, внаслідок чого вже на третьому етапі процес  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$  протікає не тільки по виступах шорсткості, а й по поверхні з нанесеного на другому етапі порошку графіту. В наслідок цього, суцільність легованої поверхні збільшується до 100 %, а також зростає глибина дифузії вуглецю.

Таким чином, в результаті використання запропонованого способу, підвищуються параметри якості поверхневих шарів сталевих деталей, сформованих методом  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$ : знижується їх шорсткість, зростає товщина, мікротвердість і суцільність.

В табл. 1 показані параметри якості поверхні зразків сталі 40X і 30X13 після  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$  традиційним і пропонованим способами.

Порівняльний аналіз параметрів якості поверхневого шару після традиційної і пропонованої технологій  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$  показав, що після обробки поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$  при  $W_p=4,6$  Дж шорсткість поверхні складає  $Ra=8,3-9,0$  мкм, а після пропонованої –  $Ra=3,2-4,8$  мкм. При цьому збільшується суцільність легованого шару до 100%, до 80 мкм збільшується глибина дифузійної зони вуглецю, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина, до 10796 МПа і до 230 мкм, відповідно.

Таким чином, в результаті проведених досліджень удосконалена можливість застосування методу ЕЛ при цементации сталевих поверхонь деталей у тому числі і підшипникових шийок (цапф) валів роторів відцентрових насосів, замість екологічно небезпечного способу хіміко-термічної обробки.

Таблиця 1 – Зведена таблиця параметрів якості поверхні зразків сталі 40X і 30X13 після  $\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$

Енергія розряду, $W_p$ , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Суцільність «білого» шару, %	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
Сталь 40X				
$\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$ традиційним способом				
0,9	25-40	5576-4243	50-60	0,9-1,1
2,6	40-70	8675-6538	70-80	5,4-6,3
4,6	55-80	8468-6976	70-80	8,5-9,2
$\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$ пропонованим способом				
0,9	60-80	11351-7303	100	0,9-1,0
2,6	90-110	11787-6962		2,6-3,8
4,6	130-240	118239-7659		3,5-4,7
Сталь 30X13				
$\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$ традиційним способом				
0,9	25-40	5730-4563	50-70	0,9-1,1
2,6	35-70	8978-6897	70-80	5,3-6,7
4,6	60-80	86-73-7925	80-90	8,2-9,7
$\text{Ц}_{\text{ЕЛ}}$ пропонованим способом				
0,9	70-90	9940-7546	100	0,9-1,1
2,6	100-120	10767-6887		2,7-3,5
4,6	150-240	10991-7989		3,-4,5

Зменшення тертя і зносу металевих поверхонь в місцях взаємодії основних вузлів машин і механізмів є актуальною проблемою сучасної науки і техніки. Відомо що для припрацювання підшипникових шийок валів, що працюють з бабітовими вкладишами, використовують дисульфід молібдену [19].

Змащувальні властивості дисульфиду молібдену забезпечуються його кристалічною структурою: зв'язки Ван-дер-Ваальса між шарами сірки дозволяють останнім вільно рухатися, в результаті чого тертя зменшується. З іншого боку, іонні зв'язки між Мо і S надають шарам високої міцності, тому вони здатні протистояти продавлюванню з боку мікровиступів поверхонь, що труться. У змащувальному шарі товщиною 2,5 мкм міститься 4000 шарів (S-Мо-S). Шари сірки, що утворюють поверхню кристала дисульфиду молібдену, забезпечують сильну адгезію до поверхні металу [20, 21].

Відомі технології сульфоціанування електроосаджених Fe-Мо покриттів [22]. Авторами експериментально встановлена найбільш раціональне сульфоціанувальне середовище – пастоподібне покриття деталей, що складається з жовтої кров'яної солі 35-40%, сірчаного колчедану 15-20%, шамоту 5-8% і сажі 25-30% зі сполучною речовиною - крохмальним клейстером. Процес сульфоціанування здійснюється при температурі 550-600°C, що дозволяє отримати зносостійке покриття з поверхневою карбонітридною зоною, насиченою сульфідами заліза і дисульфідом молібдену. Однак така технологія є екологічно небезпечною.

Незважаючи на те, що в результаті ХТО значно підвищується якість поверхневих шарів деталей машин, метод має ряд недоліків. Відбувається об'ємний нагрів деталі, що призводить до зміни її структури і початкових геометричних параметрів (деформування, викривлення); громіздке і дороге технологічне обладнання; довга тривалість процесу; великі енерговитрати; висока собівартість; екологічна та техногенна небезпека та ін.

В основу пропонований нами способу [23] поставлено задачу створення екологічно безпечної технології формування методом ЕІЛ на поверхні сталевих деталей покриття, яке має в своєму складі дисульфід молібдену. Використання такої технології підвищило б зносостійкість деталей машин і знизило коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь.

Поставлена задача вирішується тим, що на поверхні сталевих деталей методом ЕІЛ безпосередньо перед легуванням наносять консистентну речовину, що містить сірку, а потім, не чекаючи її висихання, здійснюють легування електродом-інструментом з молібдену при енергії розряду  $W_p=0,13-3,4$  Дж і продуктивності  $0,8-2,5$  см<sup>2</sup>/хв. В результаті отримують покриття, яке містить дисульфід молібдену, мікротвердістю 5147-10731 МПа, товщиною 20-70 мкм і суцільністю 65-95%, тим самим підвищуючи зносостійкість деталей машин, знижуючи коефіцієнт тертя. Спосіб є екологічно безпечний.

Посадочні шийки валів і напресовані на них деталі робочі колеса, підшипники котіння, шківні і т. ін. утворюють з'єднання з натягом у якому зовнішня циліндрична поверхня валу контактує із внутрішньою циліндричною поверхнею деталі.

Слід зазначити, що при обертанні валу ротора, під дією циклічних робочих навантажень у спряженні «ПШ-напресована деталь» виникають періодичні зсуви контактуючих поверхонь деталей. Присутність між поверхнями спряження контактного тиску і наявність амплітуди їхнього відносного зсуву обумовлюють вплив фретинг процесу (Ф-П). При роботі деталей в агресивних середовищах, інтенсивність зношування зростає. В такому разі знос поверхонь відбувається в умовах фретинг-корозії (Ф-К). Результатом дії Ф-К, може бути ослаблення посадки, збільшення вібрації, порушення з'єднання і аварії [24].

Збирання з'єднань з натягом може здійснюватися різними способами: запресовуванням валу в отвір, нагріванням деталі, яка має отвір, або охолодженням валу та ін. При цьому контактні поверхні деталей піддаються пружному і пластичному деформуванню, а ступінь деформації визначається твердістю їх поверхневого шару, причому, чим менше вихідна твердість поверхневого шару, тим більше його пластичність, інтенсивність деформації та резерви до її підвищення.

Оскільки при спільній дії контактного тиску (від посадки) і прогину (від радіальних робочих зусиль) розподіл сумарних тисків визначається величиною коефіцієнта тертя між контактними поверхнями деталей з'єднання, то для підвищення якості сполучення деталей великогабаритних збірних виробів доцільно збільшення коефіцієнта тертя шляхом нанесення покриття. При посадці, наприклад, бандажа на вісь великогабаритного прокатного валка його великогабаритних складових коефіцієнт тертя на посадкових поверхнях приймається рівним 0,14. Відомо, що при згинанні пресового з'єднання формуються ділянки проковзування, що сприяє виникненню і прояву Ф-К, що знижує, наприклад, міцність від втоми складових прокатних валків і сприяє зсуву бандажа [25].

Як правило, більшість відомих способів підвищення якості пресових з'єднань (збільшення несучої здатності, підвищення герметичності з'єднання і міцності валів, зниження Ф-К), полягають у введенні між сполученими поверхнями певних «прошарків», що мають в контактні властивості, які істотно відрізняються від вихідних, що забезпечує перенесення ковзання в проміжне середовище. Це може бути або покриття, нанесене на одну або обидві контактуючі поверхні [26, 27] або зміцнений, або знеміцнений поверхневий шар [28] і ін.

В [29] запропонований ряд способів збільшення надійності і герметичності з'єднань з натягом шляхом нанесення методом ЕІЛ спеціальних покриттів.

Нами розроблений новий спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей пар тертя [30], який належить до електроіскрового легування, і може застосовуватися для обробки сталевих деталей, поверхні яких у процесі роботи підлягають зношуванню. Спосіб включає нанесення на поверхню деталі, що підлягає зміцненню, консистентної речовини, яка приготована з включенням алюмінієвої пудри у кількості не більше 56 % по масі і бору у вигляді порошку аморфного бору у кількості, приблизно, 5 % по масі, а ЕІЛ графітовим електродом зазначеної поверхні проводять при енергії розряду  $0,13-4,9$  Дж і продуктивності  $1,0-2,0$  см<sup>2</sup>/хв.

Мікроструктурний аналіз Al-C-B покриттів на сталі 40 показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При  $W_p=0,13$  і  $0,55$  Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 15-20 мкм. Збільшення  $W_p$  до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона і основний метал. Діюметричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при  $W_p = 0,13$  Дж -  $H_c = 6487$  МПа, а при  $W_p = 4,9$  Дж -  $12350$  МПа (табл. 2).

Таблиця 2 – Якісні параметри Al-C-B покриттів, отриманих методом ЕІЛ на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Зміцнений шар: H <sub>c</sub> – мікротвердість; h – товщина; S – суцільність		
	Ra	Rz	Rmax	H <sub>c</sub> , МПа	h, мкм	S, %
0,13	1,2	2,9	7,4	6487	15	55
0,55	2,9	4,5	17,3	10351	20	75
4,9	9,3	19,5	48,2	12350	60	95

Слід відмітити, що з метою зниження шорсткості поверхні після ЦЕІЛ застосовують, як правило, методи поверхнево-пластичного деформування (ППД), серед яких на особливу увагу заслуговує метод безабразивної



ультразвукової фінішної обробки (БУФО) [31]. Крім цього обробка шийок валів після ЕІЛ методами ППД підвищує межу втомну міцності.

Технологія зміцнення та відновлення деталей типу валів заснована на суміщенні технологій ЕІЛ і ППД, які доповнюють один одного. ЕІЛ забезпечує нанесення на зміцнювані ділянки валу покриття з зносостійких матеріалів, а ППД, у свою чергу, забезпечує необхідні вимоги, що пред'являються до мікрогеометрії поверхонь, що формуються, а також підвищує втомну міцність, а в окремих випадках і мікротвердість формованих поверхонь.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що існує багато способів зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів і важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.

**Метою роботи** є підвищення довговічності валів роторів відцентрових насосів шляхом проведення порівняльних іспитів на знос.

#### **Методика досліджень**

У ПК при нормальній роботі використовують рідке або консистентне мастило, яке надійно оберігає поверхні тертя від утворення металевих зв'язків. При пуску двигуна сполучення «вал – підшипник» працює в умовах напівсухого тертя, при якому виникає металевий контакт, який викликає підвищений знос поверхонь, що труться, і подальше їх заїдання.

З метою пошуку можливості застосування електроіскрових покриттів для підвищення зносостійкості шийок валів роторів насосів та компресорів під ПК, що працюють, як правило, у парі з бабітовими підшипниками, проводилися випробування круглих зразків  $\varnothing$  50 мм і товщиною 10 мм із сталі 40X і 30X13 термооброблених, відповідно на твердість 180-190 і 235-270 НВ. Покриття зразків піддавалися наступної ППД методом БУФО. Зносостійкість покриттів визначалася машиною тертя СМЦ-2 за схемою диск - колодка. Як матеріал контртіла використовувався бабіт Б-83.

Для кожного з матеріалів (сталь 40X і сталь 30X13) виготовляли по 3 серії зразків:

- перша – без зміцнення;
- друга – зміцнена шляхом використання нового способу ЦЕІЛ;
- третя – з покриттям MoS<sub>2</sub>.

Для кожної серії виготовляли по три зразка.

Покриття зразків піддавалися наступної ППД методом БУФО.

Зносостійкість покриттів визначалася машиною тертя СМЦ-2 за схемою диск - колодка. Як матеріал контртіла використовувався бабіт Б-83. Змашування поверхонь тертя проводилося в умовах, коли нижня частина круглого зразка знаходилася у ванночці з турбінним маслом Т-22. Швидкість ковзання становила 0,78 м/с, питомий тиск – 5,0 МПа, навантаження на колодку – 1000 Н, тривалість випробувань – 8 год, що відповідало шляху тертя 22,5 км. Перед випробуваннями контртіло з бабіту розточували на токарному верстаті у спеціальному пристосуванні до збігу поверхні тертя з допуском на діаметр, що відповідає посадці ковзання. Шорсткість поверхні контртіла становила Ra = 1,6 мкм.

Далі зразки встановлювалися на машину тертя та припрацьовували протягом 1 год з питомим навантаженням 2,0 МПа. Приробіток вважався закінченим, якщо частка приробленої поверхні становила не менше 95% від номінальної. Після приробітку зразки піддавалися вимірюванням, встановлювалися на машину, навантажувалися, і проводився експеримент при постійній швидкості ковзання та питомому навантаженні.

Для виміру лінійного зносу на робочу поверхню круглого зразка на твердомірі Віккерса наносилися чотири поглиблення в діаметрально протилежних сторонах. Зразки для визначення інтегрального зносу всієї поверхні перед випробуванням зважували на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001г.

Лінійний знос визначався методом штучних баз по різниці глибин відбитків, виміряних до та після проведення експерименту, а інтегральний (ваговий) знос - як різницю ваги зразка до та після проведення випробувань.

Крім того, в процесі роботи вимірювали момент тертя, контролювалася швидкість ковзання та навантаження у зоні тертя.

З метою вибору найбільш раціональної технології формування поверхневого шару, для посадкових шийок валів що протистоїть високим питомим навантаженням, дослідженню на зносостійкість піддавалися круглі зразки  $\varnothing$ 50 і товщиною 10 мм зі сталі 40X і 30X13, термооброблені, відповідно на твердість 180-190 і 235-250 НВ. Для дослідів виготовляли дві серії зразків для кожного з матеріалів (сталь 40X і сталь 30X13):

- перша серія – зразки без зміцнення;
- друга серія – на зразки методом ЕІЛ наносили покриття складу (Al-C-B) з наступною БУФО.

Випробування проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою «кільце - плоский зразок», який служив контртілом. В якості контртіла використовували прямокутний зразок з твердого сплаву ВК8 з шорсткістю робочої поверхні Ra = 1,6 мкм. Після кожного іспиту зразок з твердого сплаву ВК8 перешліфовували.

Випробування проводили в умовах, коли нижня частина круглого зразка знаходилася у ванночці з індустріальним мастилом І40А. Швидкість ковзання становила 0,78 м/с, питомий тиск – 10 МПа, навантаження на контртіло складало – 100 Н, тривалість випробувань – 8 год, шлях тертя – 22,5 км.

Вимір лінійного і інтегрального зносу виконували за методикою представленою вище.

#### **Результати досліджень**

За отриманими даними побудовано графіки зміни коефіцієнта тертя залежно від виду зміцнення та часу випробувань (табл. 3 і рис. 1). Результати вимірювання зношування зразків як лінійного ( $\Delta h$ ), так і інтегрального ( $\Delta m$ ) занесені в табл. 4.

Таблиця 3 – Результати зміни коефіцієнта тертя сталі 40X і 30X13 залежно від виду зміцнення та часу випробувань

Матеріал зразка	Вид зміцнення	Коефіцієнт тертя $f_{тр}$							
		Час іспитів $t$ , год							
		1	2	3	4	5	6	7	8
40X	Без зміцнення	0,176	0,179	0,165	0,150	0,148	0,143	0,137	0,118
30X13	Без зміцнення	0,165	0,170	0,149	0,134	0,112	0,127	0,125	0,127
40X	Ц <sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО	0,131	0,134	0,123	0,108	0,101	0,112	0,110	0,108
30X13	Ц <sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО	0,114	0,125	0,114	0,116	0,106	0,109	0,105	0,101
40X	ЕЛЛ (Мо+S)+БУФО	0,036	0,045	0,042	0,036	0,033	0,034	0,031	0,030
30X13	ЕЛЛ (Мо+S)+БУФО	0,032	0,038	0,035	0,030	0,038	0,029	0,026	0,025

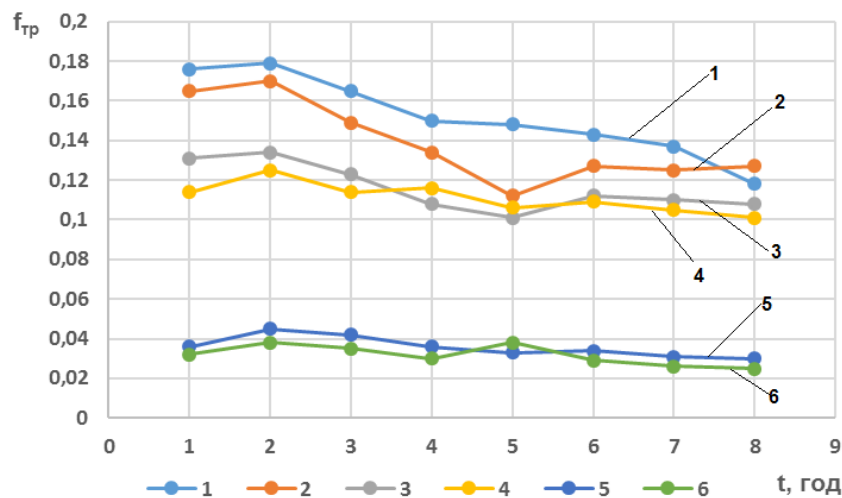


Рис. 1 - Зміна коефіцієнту тертя сталі 40X і 30X13 по бабіту в залежності від виду зміцнення та часу взаємодії: 1- шліфувана сталь 40X; 2- шліфувана сталь 30X13; 3 - Сталь 40X з Ц<sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО; 4 - Сталь 30X13 з Ц<sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО; 5 - Сталь 40X (з покриттям МоS<sub>2</sub>) + БУФО; 6 - Сталь 30X13 (з покриттям МоS<sub>2</sub>) + БУФО.

Аналіз рис. 1 показав, що найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030 належить покриттям з МоS<sub>2</sub>, сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.

Таблиця 4 – Знос зміцненої сталі 40X і 30X13 в парі з бабітом Б-83

Зміцнення	Знос	
	Ваговий $\times 10^3$ , кг	Лінійний, мкм
Сталь 40X (без зміцнення)	0,075	6,519
Сталь 30X13 (без зміцнення)	0,068	6,033
Сталь 40X з Ц <sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО	0,031	2,321
Сталь 30X13 з Ц <sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО	0,023	2,202
Сталь 40X (з покриттям МоS <sub>2</sub> ) + БУФО	0,019	1,115
Сталь 30X13 (з покриттям МоS <sub>2</sub> ) + БУФО	0,012	0,885

В результаті аналізу табл. 4 встановлено, що ваговий знос круглих зразків з шліфованої сталі 40X більший чим шліфованої сталі 30X13 в 1,15 рази і відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після Ц<sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим шліфованої сталі 30X13 в 1,09 рази і відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після Ц<sub>ЕЛЛ</sub> → БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) → БУФО.

Слід відмітити, що найменший ваговий і лінійний знос круглих зразків у сталі 30X13 після нанесення покриття складу (Мо+S) і БУФО, який складає, відповідно  $0,013 \cdot 10^{-3}$  кг і 0,90 мкм.

На рис. 2 показаний характер зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як не зміцнених, так і зміцнених в послідовності: Ц<sub>ЕЛЛ</sub> + БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО, відповідно: 1-6.

У всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється і стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність.

Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.

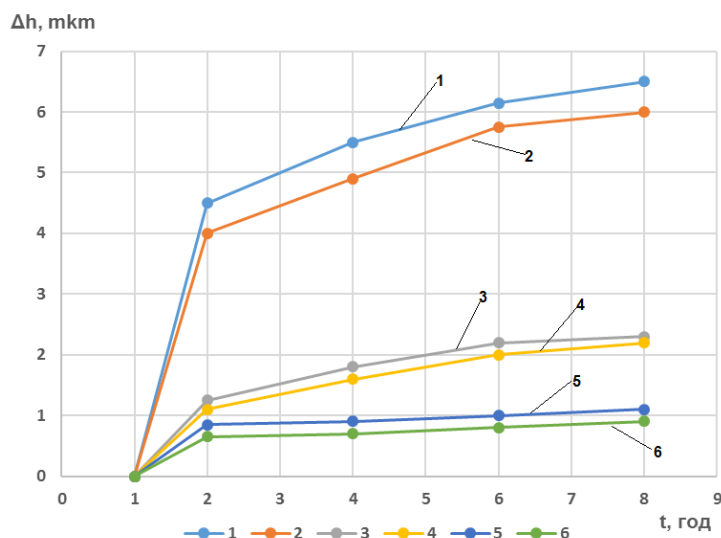


Рис. 2 - Характер зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13: не зміцнених, відповідно 1 і 2, зміцнених в послідовності: ЦЕЛ + БУФО, відповідно 3 і 4 і ЕЛ (Мо+S) + БУФО, відповідно 5 і 6, що працюють в парі з бабітом Б-83 (середовище - мастило турбінна Т-22).

З метою вибору найбільш раціональної технології формування поверхневого шару, для посадкових шийок валів що протистоїть високим питомим навантаженням, дослідженню на зносостійкість піддавалися зразки зі сталі 40X і 30X13, термооброблені, відповідно на твердість 167-207 і 235-250 НВ, зміцнені комбінованою технологією: нанесення покриття складу (Al-C-B) методом ЕЛ з наступною БУФО.

Результати випробувань зведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Результати зносу зміцнених і незміцнених круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, випробуваних у парі з твердим сплавом ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А

Матеріал	Вид зміцнення	Знос	
		ваговий $\times 10^3$ , кг	лінійний, мкм
40X	Без зміцнення	0,313	6,117
30X13	Без зміцнення	0,257	5,354
40X	ЕЛ (Al-C-B) + БУФО	0,176	3,312
30X13	ЕЛ (Al-C-B) + БУФО	0,105	1,645

Аналіз табл. 5 показав, що ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контргілом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом ЕЛ складу (Al-C-B) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7; і відповідно зі сталі 30X13 з аналогічною обробкою (ЕЛ (Al-C-B) + БУФО), відповідно на 98,0 і 71,8 %.

#### Висновки:

1. Аналіз літературних джерел показав, що в останні роки появились нові технологічні методи зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів, які використовуються за допомогою екологічно безпечного методу ЕЛ (цементация, нанесення комбінованих покриттів з  $MoS_2$ , покриттів складу Al-C-B і без проведення порівняльних випробувань на зносостійкість важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.
2. Дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що ваговий знос круглих зразків зі шліфованої сталі 40X, контактуючих в умовах змащення турбінним маслом Т-22 з бабітовими вкладишами ПК по схемі «диск-вкладиш», в 1,15 рази більший чим зі сталі 30X13 і, відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після ЦЕЛ + БУФО і ЕЛ (Мо+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і, відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після ЦЕЛ + БУФО і ЕЛ (Мо+S) + БУФО.
3. Найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030 належить покриттям з  $MoS_2$ , сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.
4. Аналіз характеру зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як зміцнених, так і не зміцнених, показав, що у всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється, стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність. Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕЛ (Мо+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.
5. Ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контргілом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом

ЕІЛ складу (АІ-С-В) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7 %; і зі сталі 30Х13 з аналогічною обробкою ЕІЛ (АІ-С-В) + БУФО, відповідно на 98,0 і 71,8 %.

#### Список литературы:

1. Энергоэффективные, альтернативные и энергосберегающие технологии: монография / В.А. Марцинковский, В.Б. Тарельник, Б. Антошевский и др.; Под ред. проф. В.А. Марцинковского и проф. В.Б. Тарельника.- г. Сумы: Издательство «МакДен»: рус. яз., 2016.- 317 с.: с .....ил.
2. Лучин Г.А., Пешти Ю.В., Снопов А.И. Газовые опоры турбомашин. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с
3. Боровский В.И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов.- М.: Машиностроение, 1989.- 183 с.
4. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhail'chenko, O. B. Kovalev [et al.] // J. of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – No. 1. – P. 159–168.
5. Morand, G., Chevallier, P., Bonilla-Gameros, L., Turgeon, S., Cloutier, M., Da Silva Pires, M., Sarkissian, A., Tatoulian, M., Houssiau, L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel (2021) Surface and Interface Analysis, 53 (7), pp. 658-671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
6. B. Antoszewski and V. Tarel'nyk, "Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals", Applied Mechanics and Materials, Vol. 630, pp. 301-307, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>
7. Pliszka, I., Radek, N. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition (2017) Procedia Engineering, 192, pp. 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
8. Mashkov, Y.K., Korotaev, D.N., Baibaratskaya, M.Y. et al. Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. Tech. Phys. 60, 1489–1493 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063784215100217>
9. Tarel'nyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarel'nyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 57, 173–184 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
10. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 40(2): 175 (2010).
11. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, Engineering, Scientific Research Publishing, 9(3): 942 (2011).
12. S. Ben Slima, Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing, 9(3): 640 (2012).
13. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 54: 147 (2018).
14. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarel'nyk, O. O. Vasylenko, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 41, No. 1: 47 (2019). <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
15. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, V. S. Martsinkovskii, Chem Petrol Eng 53: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
16. Патент України на винахід № 82948, 23с 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.
17. Патент України на винахід № 101715, МПК 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братуцак / опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.
18. Патент України на корисну модель №142822, МПК (2020.01) С23С 8/00, С23С 28/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко / опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
19. Є.К. Солових, В.В. Акулін, А.Є. Солових, С.Є. Катиринич. Підвищення функціональних властивостей гальванічних полімерометалевих покриттів на основі міді при проточному нарощуванні зношених поверхонь /Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2015, вип. 28. С. 24-29.
20. Ицук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. - К.: Наукова думка, 1996. - 513 с.,
21. Композиции на основе полидиэтилсилоксана и модифицированных кремнеземов: улучшение смазочных характеристик / Л.И. Борисенко, С.А. Радзиевская, Д.А. Щербаков, Н.В. Борисенко, В.М. Богатырев, И.И. Войтко // Поверхность. - 2015. - Вып. 7(22). - С. 137-146.
22. Гнездилова Ю.П. Упрочнение сульфидицированием электроосажденных железо-молибденовых покрытий для восстановления деталей машин [Текст] / Ю.П. Гнездилова, В.В. Серебровский - Курск: Изд-во КГСХА. - 2008. - 143 с.
23. Патент України на корисну модель №144932, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00. Спосіб формування покриття на поверхні сталеві деталі методом електроіскрового легування / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21.
24. Martsynkovskyy V., Tarel'nyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling—Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22)
25. Лебедь В.Т., Кулаченко А.А. Оптимизация технологии нанесения покрытий в соединениях крупногабаритных составных валков для повышения несущей способности. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. Краматорськ – Київ, 2008. Вип. №23. С. 240–247.
26. Куценко А.В., Башкарев А.Я. Управление фрикционными свойствами полиимидных покрытий в соединениях с натягом. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. №1(238) , 2016.-С. 155-162.
27. Асланян И. Р., Криони Н. К., Шустер Л. Ш. Трибологические характеристики электролитических покрытий в различных условиях трения. Уфа: УГАТУ, 2013 Т. 17, № 8 (61). С. 24–28.
28. Селиванов К.С., Галиакбаров Р.Ф. Повышение фреттинг-стойкости деталей машин комплексной вакуумной плазменной обработкой. Авиационно-космическая техника и технология. Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа. 2011, №7 (84).- С.29-32.
29. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Павлов А.Г. Проблемы и перспективы повышения качества неподвижных соединений. Машинобудування. 2012. № 9. С. 218-232.
30. Патент України на корисну модель № 148495, МПК (2021.01) В23Н 1/00, В23Н 7/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей пар тертя / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, Є.В. Конопляченко, Н.В. Тарельник, О.А. Саржанов, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко, А.Д. Поливаний, М.А. Зенкін, Т.П. Волошко / опубл. 11.08.2021, Бюл.№ 32.
31. Нежибецкий Г.Н., Шкурко А.И. Втулки концевых уплотнений ротора. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования: монография. 2017. С. 191-193.

#### Bibliography (transliterated):

1. Jenergojefektivnyje, al'ternativnyje i jenergosberegajushhie tehnologii: monografija / V.A. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik, B. Antoshevskij i dr.; Pod red. prof. V.A. Marcinkovskogo i prof. V.B. Tarel'nika.- g. Sumy: Izdatel'stvo «MakDen»: rus. jaz., 2016.- 317 s.: s .....il.
2. Luchin G.A., Peshiti Ju.V., Snopov A.I. Gazovye opory turbomashin. - M.: Mashinostroenie, 1989. - 240 s
3. Borovskij V.I. Jenergeticheskie parametry i harakteristiki vysokooborotnyh lopastnyh nasosov.- M.: Mashinostroenie, 1989.- 183 s.
4. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhail'chenko, O. B. Kovalev [et al.] // J. of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – No. 1. – P. 159–168.

5. Morand, G., Chevallier, P., Bonilla-Gameros, L., Turgeon, S., Cloutier, M., Da Silva Pires, M., Sarkissian, A., Tatoulian, M., Houssiau, L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel (2021) *Surface and Interface Analysis*, 53 (7), pp. 658-671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
6. B. Antoszewski and V. Tarelnyk, "Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 630, pp. 301-307, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>
7. Pliszka, I., Radek, N. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition (2017) *Procedia Engineering*, 192, pp. 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
8. Mashkov, Y.K., Korotaev, D.N., Baibaratskaya, M.Y. et al. Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. *Tech. Phys.* 60, 1489–1493 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063784215100217>
9. Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarelnyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 57, 173–184 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
10. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 40(2): 175 (2010).
11. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, *Engineering, Scientific Research Publishing*, 9(3): 942 (2011).
12. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 9(3): 640 (2012).
13. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54: 147 (2018).
14. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, O. O. Vasylenko, *Metallofiz. NoveishieTehnol.*, 41, No. 1: 47 (2019). <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
15. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, V. S. Martsinkovskii, *Chem Petrol Eng* 53: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
16. Patent Ukrainy na vynakhid № 82948, 23s 8/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziynym lehuванняm / V.S.Martsynkovskiyi, V.B.Tarelnyk, A.V.Belous / Opubl. 25.03.2008, biul. № 10.
17. Patent Ukrainy na vynakhid № 101715, MPK 23N 9/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziynym lehuванняm / V.S. Martsynkovskiyi, V.B. Tarelnyk, M.P. Bratushchak / opubl. 25.01.2013, biul. № 8.
18. Patent Ukrainy na korynsnu model №142822, MPK (2020.01) C23C 8/00, C23C 28/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroiskrovym lehuванняm / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, V.O. Pyrohov, A. D. Lazarenko / opubl. 25.06.2020, Biul. № 12.
19. Ye.K. Solovykh, V.V. Akulin, A.Ie. Solovykh, S.Ie. Katyrynych. Pidvyshchennia funktsionalnykh vlastyivostei halvanichnykh polimerometalevykh pokryttiv na osnovi midi pry protochnomu naroshchuvanni znoshenykh poverkhon / *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 2015, vyp. 28. S. 24-29.
20. Ishhuk Ju.L. Sostav, struktura i svoystva plastichnykh smazok. - K.: Naukova dumka, 1996. - 513 c.,
21. Kompozicii na osnovie polidijetilsiloksana i modifitsirovannykh kremnezemov: uluchshenie smazochnykh harakteristik / L.I. Borisenko, S.A. Radzievskaia, D.A. Shherbakov, N.V. Borisenko, V.M. Bogatyrev, I.I. Vojtko // *Poverhnost'*. - 2015. - Vyp. 7(22). - S. 137-146.
22. Gnezdilova Ju.P. Uprochneniye sul'focianirovaniem jelektroosazhennykh zhelezo-molibdenovykh pokrytij dlja vosstanovleniya detalej mashin [Tekst] / Ju.P. Gnezdilova, V.V.Serebrovskij - Kursk: Izd-vo KGSZA. - 2008. - 143 s.
23. Patent Ukrainy na korynsnu model №144932, MPK (2020.01), B23H 1/00, B23H 9/00. Sposib formuvannia pokryttia na poverkhni stalevoi detali metodom elektroiskrovoho lehuвання / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, V.O. Pyrohov, A.D. Lazarenko; opubl. 10.11.2020, Biul. № 21.
24. Martsynkovskyy V., Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling—Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22)
25. Lebed' V.T., Kulachenko A.A. Optimizatsiia tehnologii naneseniya pokrytij v soedineniyah krupnogabaritnykh sostavnykh valkov dlja povysheniya nesushhej sposobnosti. *Nadijnist' instrumentu ta optimizatsiia tehnologichnih sistem* : zb. nauk. prac'. Kramators'k – Kiiv, 2008. Vip. №23. S. 240–247.
26. Kushhenko A.V., Bashkarev A.Ja. Upravlenie frikcionnymi svoystvami polimidnykh pokrytij v soedineniyah s natjagom. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. №1(238)'*, 2016.-S. 155-162.
27. Aslanjan I. R., Krioni N. K., Shuster L. Sh. Tribologicheskie harakteristiki jelektroliticheskikh pokrytij v razlichnykh uslovijah trenija. Ufa: UGATU, 2013 T. 17, № 8 (61). S. 24–28.
28. Selivanov K.S., Galiakbarov R.F. Povshenie fretting-stojkosti detalej mashin kompleksnoj vakuumnoj plazmennoj obrabotkoj. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehnicheskij universitet. Ufa. 2011, №7 (84).*- S.29-32.
29. Tarel'nik V.B., Marcinkovskij V.S., Belous A.V., Pavlov A.G. Problemy i perspektivy povysheniya kachestva nepodvizhnykh soedinenij. *Mashynobuduvannia. 2012. № 9. S. 218-232.*
30. Patent Ukrainy na korynsnu model № 148495, MPK (2021.01) B23H 1/00, B23H 7/00. Sposib zmitsnennia poverkhon stalevykh detalei par tertia / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, Ye.V. Konoplianchenko, N.V. Tarelnyk, O.A. Sarzhanov, V.O. Pyrohov, A.D. Lazarenko, A.D. Polyvani, M.A. Zenkin, T.P. Voloshko opubl. 11.08.2021, Biul.№ 32.
31. Нежибецкий Г.Н., Шкурко А.И. Втулки концевых уплотнений ротора. *Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования: монография. 2017. С. 191-193.*

Поступила (received) 15.02.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Тарельник Вячеслав Борисович (Tarelnyk Viacheslav Borysovych)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, м. Суми; тел.: +38(050) 307-25-72; e-mail: tarelnyk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2005-5861

**Пірогов Віктор Олександрович (Pirogov Viktor Oleksandrovych)** – аспірант кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, м. Суми; тел.: +38(066) 529-53-60; e-mail: viktor80ua@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6335-1276

**СТРЕЛЬЧУК Р. М., ШЕЛКОВИЙ О. М.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРУ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІНОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ**

У роботі проведено експериментальне дослідження та моделювання в графічному середовищі Simulink міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів важкооброблюваних матеріалів. По експериментально отриманим осцилограмам струмів і напруг у зоні різання розроблена імітаційна модель міжелектродного зазору. Модель реалізує нелінійну залежність активного опору міжелектродного зазору від його величини, що дозволяє враховувати вплив міжелектродного середовища на параметри електророзрядних імпульсів. В результаті аналізу експериментальних осцилограм струмів робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси може бути з достатньою точністю представлена у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності та ємність. Встановлено, що активний опір міжелектродного проміжку нелінійно залежить від його величини. Середньоквадратичне відхилення між розрахунковими та експериментальними імпульсами струму і напруги, віднесене до його значення, не перевищує 12-15%. Знайдені значення параметрів схеми заміщення дозволили отримати Simulink-модель міжелектродного проміжку при електроерозійному шліфуванні. Добрий збіг розрахункових осцилограм, отриманих у Simulink-моделі, з експериментальними, показало, що розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні досить адекватно відображає реальні електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі.

**Ключові слова:** міжелектродний зазор, осцилограма струму і напруги, схема заміщення, електричні процеси, імітаційна модель.

**СТРЕЛЬЧУК Р. М., ШЕЛКОВОЙ А. Н.**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ШЛИФОВАНИИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ**

В работе проведено экспериментальное исследование и моделирование в графической среде Simulink межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов труднообрабатываемых материалов. По экспериментально полученным осциллограммам токов и напряжений в зоне резания разработана имитационная модель межэлектродного зазора. Модель реализует нелинейную зависимость активного сопротивления межэлектродного промежутка от его величины, которая позволяет учитывать влияние межэлектродной среды на параметры электроразрядных импульсов. В результате анализа экспериментальных осциллограмм токов рабочих импульсов было установлено, что электрические процессы, протекающие в межэлектродном зазоре при электроэрозионном шлифовании носят колебательный характер. Среда, в которой протекают эти процессы может быть с достаточной точностью представлена в виде Т-образной схемы замещения, включающей в себя активные сопротивления, индуктивности и емкость. Установлено, что активное сопротивление межэлектродного зазора нелинейно зависит от его величины. Среднеквадратичное отклонение между расчетными и экспериментальными импульсами тока и напряжения, отнесенное к его установившемуся значению, не превышает 12-15%. Найденные значения параметров схемы замещения позволили получить Simulink-модель межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании. Хорошее совпадение расчетных осциллограмм, полученных в Simulink-модели, с экспериментальными, показало что разработанная модель межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании достаточно адекватно отражает реальные электрические процессы, протекающие в межэлектродном зазоре.

**Ключевые слова:** межэлектродный зазор, осциллограмма тока и напряжения, схема замещения, электрические процессы, имитационная модель.

**STRELCHUK R.M., SHELKOVYI O. M.**

## **SIMULATION OF THE INTERELECTRODE GAP IN ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING WITH CHANGING ELECTRODE POLARITY**

In this paper, an experimental study and simulation in the Simulink graphical environment of the interelectrode gap during electroerosive grinding with changing polarity of electrodes of difficult-to-machine materials was carried out. Based on the experimentally obtained oscillograms of currents and voltages in the cutting zone, a simulation model of the interelectrode gap has been developed. The model implements a nonlinear dependence of the active resistance of the interelectrode gap on its value, which makes it possible to take into account the influence of the interelectrode medium on the parameters of electric discharge pulses. As a result of the analysis of the experimental oscillograms of the currents of the working pulses, it was found that the electrical processes occurring in the interelectrode gap during electroerosive grinding are oscillatory. The environment in which these processes take place can be represented with sufficient accuracy in the form of a T-shaped equivalent circuit, which includes active resistances, inductances and capacitance. It has been established that the active resistance of the interelectrode gap depends nonlinearly on its value. The root-mean-square deviation between the calculated and experimental current and voltage pulses, referred to its steady-state value, does not exceed 12-15%. The found values of the equivalent circuit parameters made it possible to obtain a Simulink model of the interelectrode gap in electroerosive grinding. A good agreement between the calculated oscillograms obtained in the Simulink model and the experimental ones showed that the developed model of the interelectrode gap during electroerosive grinding quite adequately reflects the real electrical processes occurring in the interelectrode gap.

**Keywords:** interelectrode gap, current and voltage waveform, equivalent circuit, electrical processes, simulation model.

**1. Вступ.** У зоні різання в умовах електроерозійного шліфування діють електричні розряди, що виникають при пробі міжелектродного середовища між стружкою або поверхнею матеріалу і зв'язкою круга, при ковзанні стружки по зв'язці, електричні розряди, що ініціюються вибуховою електроерозією перемикаючих елементів. Процес взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів не досліджений, а зона різання комбінованої обробки не вивчена [1,2]. У зв'язку з цим у роботі зроблено моделювання процесу, що відбувається в зоні різання, та встановлені особливості та закономірності взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу.

**2. Аналіз літератури.** Зона обробки при електроерозійному алмазному шліфуванні є складною електрофізичною системою [3,4]. Вона є одночасно місцем мікрорізання та дії електричних розрядів у міжелектродному проміжку. При додатку напруги в цій зоні виникає електричний струм, який проходить через перемикаючі міжелектродний проміжок струмопровідні містки, робочу рідину, що володіє деякою електропровідністю, і через канал розряду, що виникає, в період його дії.



Розмір зони обробки визначається шириною фронту роботи шліфувального круга та величиною міжелектродного зазору, тобто. відстанню між зв'язкою круга і поверхнею оброблюваного матеріалу деталі. У зоні обробки, поряд зі стружкоутворенням та дією розрядів, відбуваються складні механічні та електрофізичні процеси: контактні-фрикційні, термічні, електричні, плазмохімічні та електрогідралічні; мають місце високочастотні коливання та кавітація рідкого середовища.

Основне, що домінує дію електричної енергії в зоні обробки проявляється в електроерозійних процесах та явищах комбінованого характеру, різної тривалості та інтенсивності. Вони мають місце на ділянках контактної та безконтактної взаємодії круга зі зрізаною стружкою та оброблюваним матеріалом, де поверхні цих електродів впритул наближаються один до одного і де можливий дотик, утворення переривчастих або щільних контактів та їх розрив. Таким чином, зона електроерозійного алмазного шліфування характеризується контактною та безконтактною електроерозією [5].

**3. Методи дослідження.** Модель межелектродного зазору характеризує електродинамічні процеси, котрі виникають у ньому, і визначаються типом і параметрами схеми заміщення. З метою обґрунтованого вибору типу та параметрів моделі міжелектродного зазору експериментально були отримані осцилограми струмів технологічних імпульсів при різних величинах цього зазору (рис. 1).

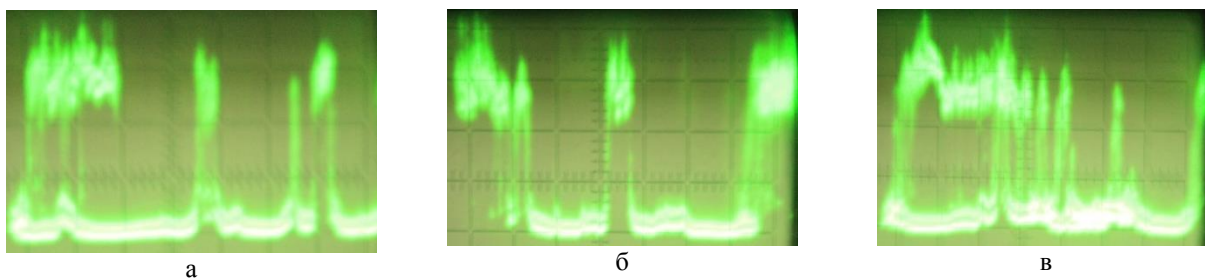


Рис. 1 – Осцилограми струмів у міжелектродному зазорі величиною: а – 7 мкм; б – 14 мкм; в – при короткому замиканні.

Експериментальні дослідження проводилися на базі верстата моделі ЗД642Е. Додаткова енергія в зону різання вводилася від генератора імпульсів НО 6506, що перетворює змінний струм напругою 380В уніполярний імпульсний струм. Регулювання напруги, амплітуди розрядного струму, частоти та шпаруватості проводилося від генератора імпульсів. Застосовувалася торцева схема шліфування, яка здійснювалася чашковими колами конічної форми 12А2-45° 150×10×3×32 на зв'язці М1-01 з алмазними зернами АС6 з зернистістю 100/80 і концентрацією 4. Перед експериментами алмазні круги попередньо правились і прироблялись на протязі 5-10 хвилин. В якості оброблюваного матеріалу деталі використовувалися твердосплавні пластини марки ВК6 з розмірами 14×14×5 мм. Пристрій для здійснення способу електроерозійного алмазного шліфування зі зміною полярністю електродів наведено на рис.2.



Рис. 2 – Пристрій для здійснення електроерозійного способу шліфування зі змінною полярністю електродів

Електричні режими генератора технологічних імпульсів: амплітуда імпульсів напруги – 50 В, частота технологічних імпульсів – 44 КГц, шпаруватість імпульсів – 1. Осцилограми реєструвалися осцилографом моделі С1-101, підключення якого здійснювалося згідно зі схемою представленою на рис. 3. Величина міжелектродного проміжку фіксувалася індикатором годинникового типу з ціною розподілу 1 мкм.

Аналіз електричної схеми генератора імпульсів НО 6506 та осцилограм струмів при різних величинах міжелектродного зазору (рис.1) дозволяє з достатньою точністю обмежитися Т-подібною схемою заміщення, що враховує реактивні опори генератора технологічних імпульсів та міжелектродного зазору.



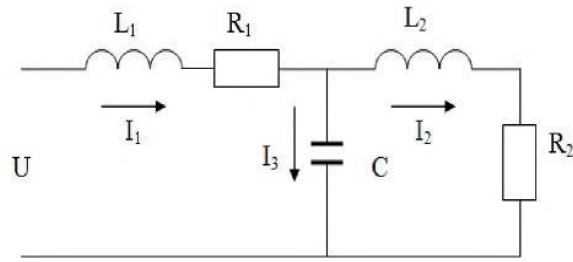


Рис. 3 – Схема заміщення міжелектродного зазору.

Оскільки струм у міжелектродному зазорі має яскраво виражену коливальну складову, то схема заміщення включає коливальний RLC-контур, представлений на рис. 3. Активні опір генератора технологічних імпульсів  $R_1$  і навантаження (міжелектродного проміжку)  $R_2$  можуть бути знайдені за значеннями падіння напруги  $U_2$ , що встановилася, на опір  $R_2$  і струму  $I_2$  при відомій величині амплітуди імпульсів холостого ходу генератора  $U$ :

$$R = \frac{U - U_2}{I_1}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2}. \quad (2)$$

**4. Результати дослідження.** В результаті обробки осцилограм було отримано значення активних опір  $R_1$  і  $R_2$  для різних значень міжелектродного зазору (табл.1). На рис.4 наведено залежність відносного опір величини міжелектродного зазору.

Табл. 1 – Значення активних опір

Міжелектродний зазор $S$ , мкм	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом
Коротке замикання, 0	4,85	0
1	4,85	0,13
2	4,85	0,27
3	4,85	0,51
4	4,85	0,77
5	4,85	1,21
6	4,85	1,75
7	4,85	2,52
8	4,85	4,48

На рис.4 показано, що відносний опір міжелектродного проміжку  $R_{отн} = R_2/R_1$  нелінійно залежить від величини міжелектродного проміжку  $S$ . Оскільки при заданій напрузі генератора  $U$  існує граничне значення міжелектродного проміжку  $S$ , при якому електричний розряд не виникає, то зазначену залежність  $R_{отн} = f(S)$  можна апроксимувати виразом [6]:

$$R_{отн} = 0,011 \cdot S^{2,843} \quad (3)$$

де 0,011 та 2,843 – коефіцієнти апроксимації, знайдені за методом найменших квадратів, що залежать від амплітуди робочих імпульсів генератора та електричних параметрів схеми заміщення.

Для визначення інших параметрів схеми заміщення, а саме  $L_1$ ,  $L_2$  і  $C$  були знайдені координати декількох характерних точок на експериментально знятій осцилограмі перехідного процесу одиничного електричного розряду (рис.1в). Параметрична ідентифікація осцилограми (рис.4) оцифрувалась у програмі OriginPro. Ці точки задовольняють рішення системи диференціальних рівнянь перехідного процесу, що протікає в Т - образній схемі заміщення [7].

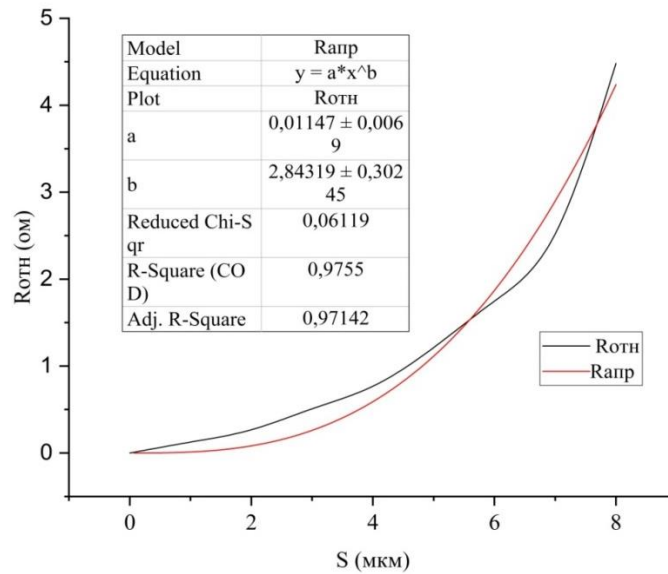


Рис. 4 – Залежність відносного опору від величини міжелектродного зазору

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + U_C = U \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 = U_C \\ C \frac{dU_C}{dt} = I_1 - I_2 \end{cases} \quad (4)$$

Мірою адекватності експериментальних даних та розрахункових значень, отриманих в результаті рішення системи (4) є квадрат відстані між експериментальними та розрахунковими точками:

$$F(L_1, L_2, C) = \sum_{i=1}^{50} (t_i - t_{pi})^2 + \sum_{i=1}^{50} (I_i - I_{pi})^2 \quad (5)$$

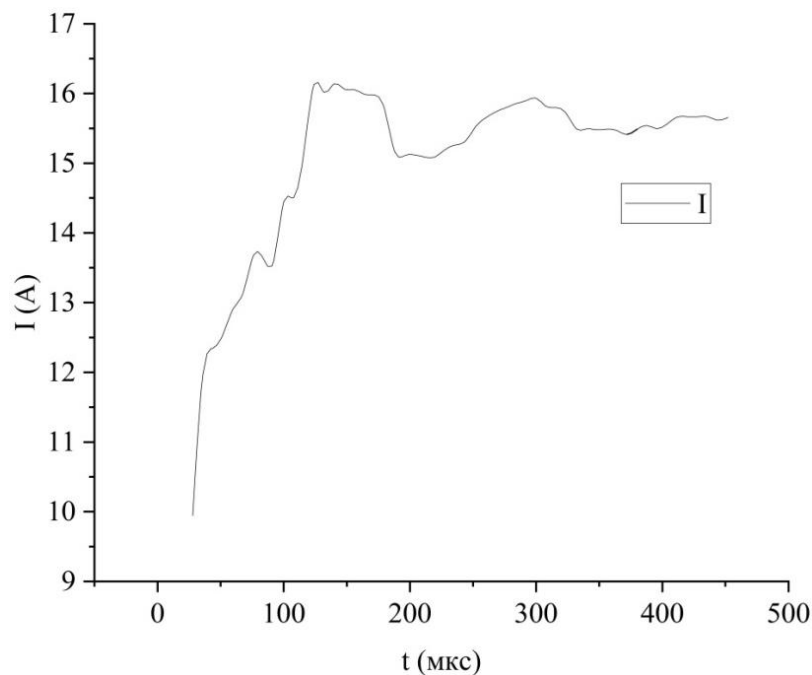


Рис. 5 – Приклад оцифрування імпульсу струму

Розрахункові точки також вибираються на екстремальних значеннях рішення (рис.5). Мінімізуючи  $F(L_1, L_2, C)$  змінними  $L_1, L_2$  і  $C$  можна визначити їх значення. Мінімізація здійснювалася у програмі Matlab з використанням

симплекс методу Нелдера-Міда [8]. В результаті були отримані наступні усереднені по всій серії дослідів значення параметрів схеми заміщення:  $L_1=173\mu\text{Гн}$ ,  $L_2=173\mu\text{Гн}$  і  $C=18\text{ мкФ}$ .

На рис.6 представлена розрахункова крива, отримана в результаті мінімізації рішення (4) за критерієм (5) та експериментальна крива, знята з осцилограми рис.1в, що підтверджують гарний збіг результатів розрахунку та експерименту.

На основі прийнятого типу та знайдених параметрів схеми заміщення міжелектродного зазору була розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному алмазному шліфуванні в програмі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Структурна схема моделі міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні представлена рис.7.

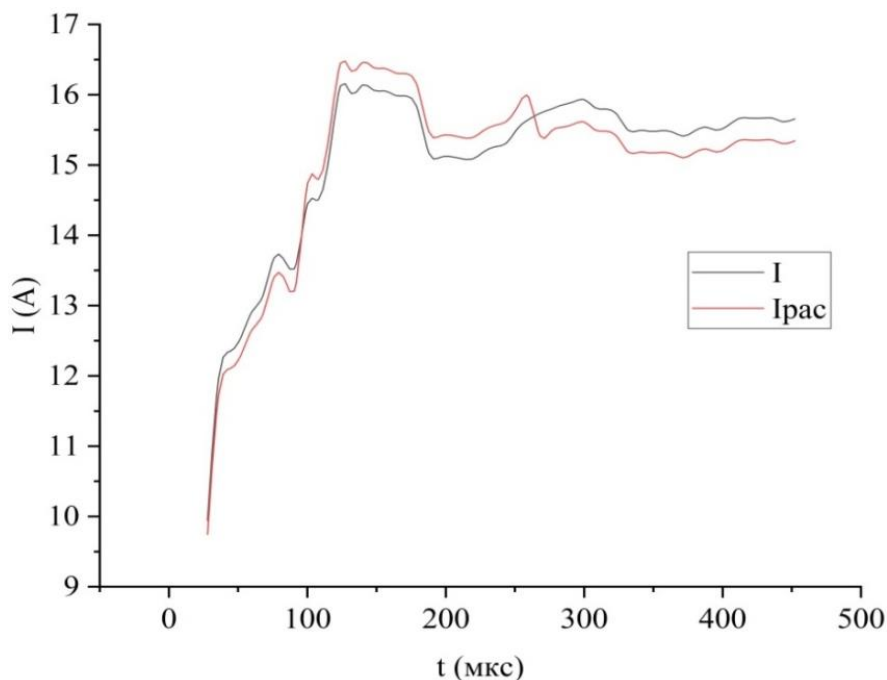


Рис. 6 – Розрахункові та експериментальні значення імпульсу струму в міжелектродному зазорі

На рис.8 наведено розрахункові осцилограми потужності, струму та напруги у міжелектродному зазорі. Розрахункові осцилограми отримані у розробленій Simulink-моделі міжелектродного зазору. Поява імпульсу струму в початковий час на розрахункових осцилограмах обумовлено електричної ємністю зазору між алмазним кругом і поверхнею оброблюваного матеріалу до виникнення розряду. Наявність цієї ємності в експерименті не враховується, оскільки вона практично не впливає на процес електроерозійного алмазного шліфування. Таким чином, в результаті аналізу експериментальних осцилограм струму робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі, при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси, може бути з достатньою точністю представлено у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності і ємність. Електроерозійні процеси та явища, пов'язані з розмиканням контактів з подальшою дією розрядів, можуть мати місце, коли відбувається розрив електричного ланцюга шляхом усунення перемикаючих міжелектродний проміжок містків (стружок). Розрив ланцюга відбувається в момент закінчення стружоутворення, коли стружка викидається різальним зерном з міжелектродного проміжку зони обробки. При цьому можлива одночасне або послідовне розмикання у двох контактних точках - у верхній, де стружка стикається з зв'язкою круга, і - в нижній, де вона пов'язана з оброблюваним матеріалом і відбувається відділення стружки від його поверхні.

**Висновки.** В результаті аналізу експериментальних осцилограм струмів робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси може бути з достатньою точністю представлено у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності і ємність. Встановлено, що активний опір міжелектродного зазору нелінійно залежить від його величини. Середньоквадратичне відхилення між розрахунковими та експериментальними імпульсами струму та напруги, віднесене до його встановленого значення, не перевищує 12-15%. Знайдені значення параметрів схеми заміщення дозволили отримати Simulink-модель міжелектродного зазору при електро-ерозійному шліфуванні. Добрий збіг розрахункових осцилограм, отриманих в Simulink-моделі, з експериментальними, показало що розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні досить адекватно відображає реальні електричні процеси, що протікають в міжелектродному зазорі.

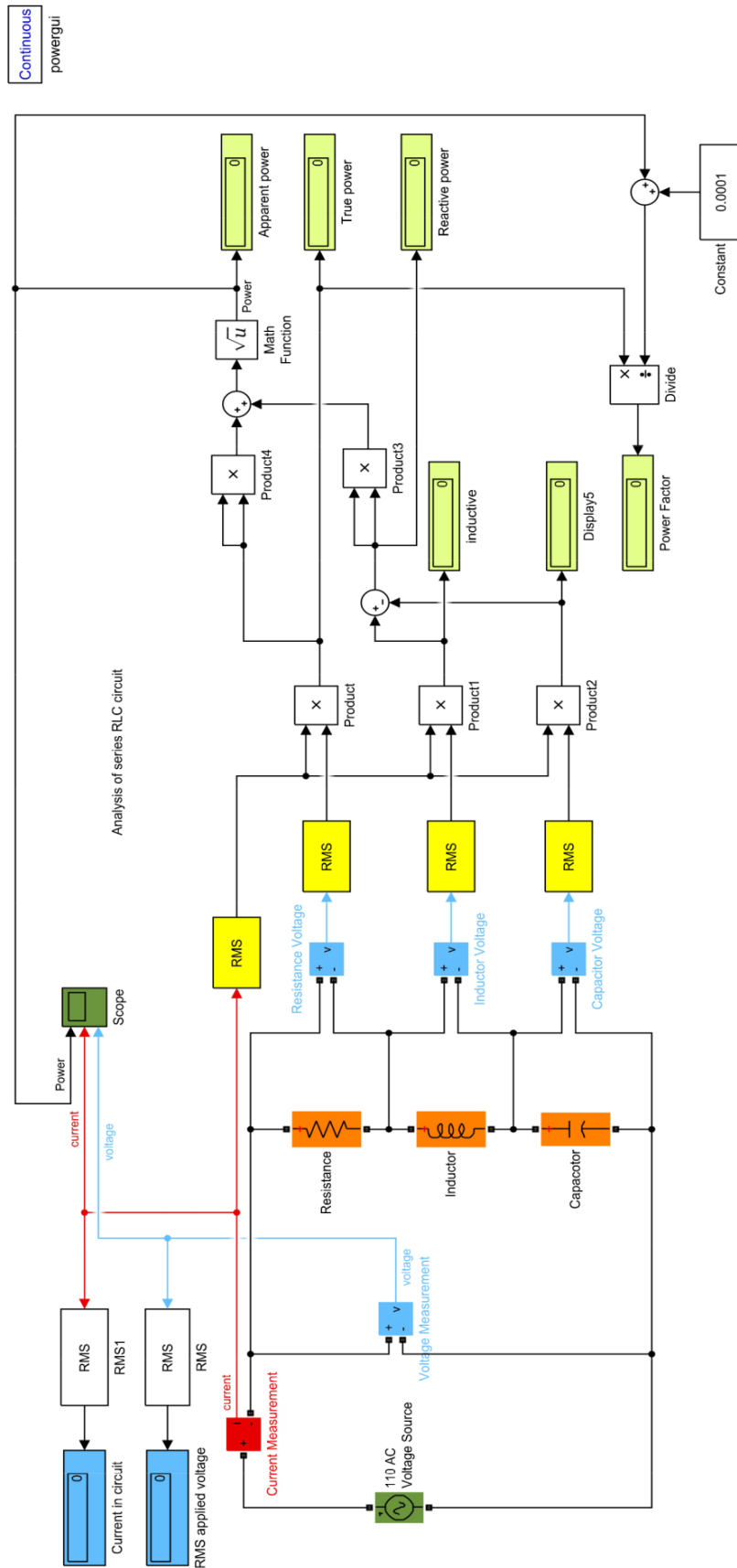


Рис. 7 – Модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні

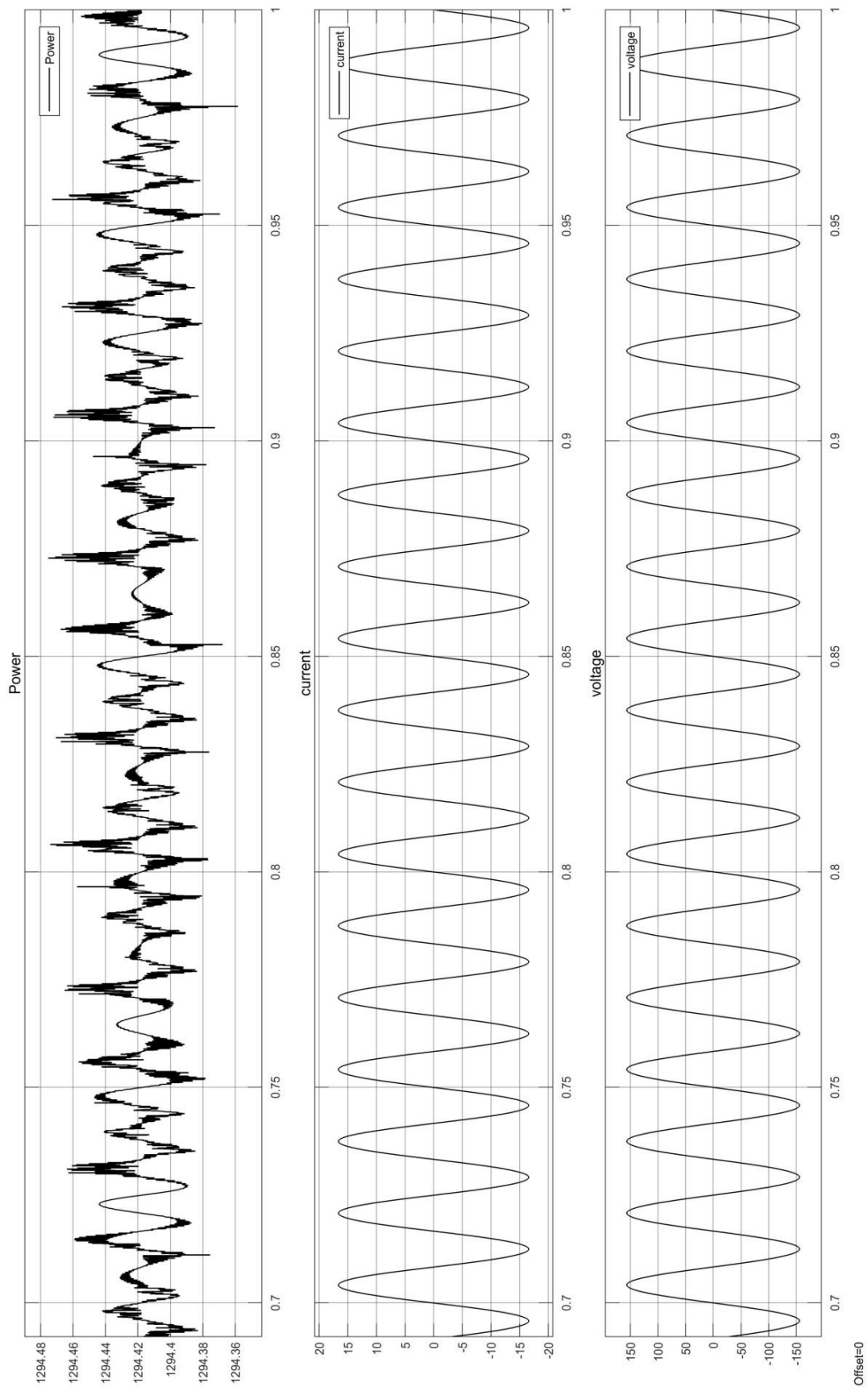


Рис. 8 – Розрахункові осцилограми потужності, струму та напруги у міжелектродному зазорі

## Список литературы

1. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № u 201806851; заявл. 18.06.2018; опубл. 11.02.2019.–Бюл. № 3.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // Silicon 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // Met. Mater. Int. 26, p. 1045–1059 (2020).
4. D'Urso, G., Maccarini, G., Ravasio, C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide // Int J. Adv. Manuf. Technol. 85, p. 2013–2025 (2016).
5. Giridharan, A., Samuel, G. Investigation into erosion rate of AISI 4340 steel during wire electrical discharge turning process // Machining Science and Technology, p. 287–298, (2018).
6. Сухов А.Н. Математическая обработка результатов измерений. – М.: МИСИ, 1982. – 89 с.
7. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем – Минск: ДизайнПРО, 2004 – 640 с.
8. Andreani, R., Haeser, G., Martínez, J.M. // On sequential optimality conditions for smooth constrained optimization, Optimization 60 (2011), pp. 627–641.

## References (transliterated)

1. Strelchuk R.M., Uzunian M.D. Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoiu poliamistiu elektrodov, Patent UA, no. 131894, 2019.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // Silicon 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // Met. Mater. Int. 26, p. 1045–1059 (2020).
4. D'Urso, G., Maccarini, G., Ravasio, C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide // Int J. Adv. Manuf. Technol. 85, p. 2013–2025 (2016).
5. Giridharan, A., Samuel, G. Investigation into erosion rate of AISI 4340 steel during wire electrical discharge turning process // Machining Science and Technology, p. 287–298, (2018).
6. Sukhov A. N. Matematicheskaya obrabotka rezultatov izmerenij. – Moscow: MISI, 1982. – 89 p.
7. Tarasik V. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem. – Minsk: DizajnPRO, 2004 – 640 p.
8. R.Andreani, G.Haeser, J.M.Martínez // On sequential optimality conditions for smooth constrained optimization, Optimization 60 (2011), pp. 627–641.

Поступила (received) 15.03.2022

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Стрельчук Роман Михайлович (Стрельчук Роман Михайлович, Strelchuk Roman Mykhailovych)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викл. кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.

**Шелковий Олександр Миколайович (Шелковой Александр Николаевич, Shelkovyi Oleksandr Mykolaiovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7414-4854>; e-mail: alnikshelk@gmail.com.

**НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.**

## **РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТА УМОВ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ**

У роботі розроблено теоретичний підхід до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення із урахуванням балансу тепла, що надходить в стружки та оброблювану деталь. Встановлено, що зі збільшенням часу контакту круга з оброблюваним матеріалом температура різання безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимальної температури різання, яка визначається відношенням умовного напруження різання до питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Виходячи з цього, запропоновано максимальну температуру різання розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає його потенційні можливості та дозволяє порівнювати різні методи механічної обробки за температурним критерієм й вибирати найбільш ефективні з них. На цій основі обґрунтовано основний напрям зниження температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки, який полягає у зменшенні максимальної температури різання до рівня та нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це дозволяє здійснити шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання. Показано, що основною умовою зменшення максимальної температури різання є зменшення умовного напруження різання.

**Ключові слова:** баланс тепла, температурний критерій, якість та продуктивність обробки, умовне напруження різання, високошвидкісна обробка, швидкість деталі

**НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.**

## **РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И УСЛОВИЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

В работе разработан теоретический подход к определению температуры резания при шлифовании и условий ее уменьшения с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь. Установлено, что с увеличением времени контакта круга с обрабатываемым материалом температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальной температуре резания, которая определяется отношением условного напряжения резания к удельной теплоемкости и плотности обрабатываемого материала. Исходя из этого, предложено максимальную температуру резания рассматривать новым универсальным технологическим параметром обработки, определяющим его потенциальные возможности и позволяющим сравнивать различные методы механической обработки по температурному критерию и выбирать наиболее эффективные из них. На этой основе обосновано основное направление снижения температуры резания и повышения качества и производительности обработки, которое состоит в уменьшении максимальной температуры резания до уровня и ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Это позволяет осуществить шлифование со значительной производительностью обработки фактически без повышения температуры резания. Показано, что основным условием для уменьшения максимальной температуры резания является уменьшение условного напряжения резания.

**Ключевые слова:** баланс тепла, температурный критерий, качество и производительность обработки, условное напряжение резания, высокоскоростная обработка, скорость детали

**NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.**

## **DEVELOPMENT OF THEORETICAL APPROACH TO DETERMINATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING GRINDING AND CONDITIONS OF ITS REDUCTION**

The paper develops a theoretical approach to determining the cutting temperature during grinding and the conditions for its decrease, taking into account the balance of heat leaving the chips and the workpiece. It has been established that with an increase in the contact time of the wheel with the material being processed, the cutting temperature continuously increases, asymptotically approaching the maximum cutting temperature, which is determined by the ratio of the conditional cutting stress to the specific heat capacity and density of the material being processed. Based on this, it is proposed to consider the maximum cutting temperature as a new universal technological processing parameter that determines its potential and allows comparing various machining methods according to the temperature criterion and choosing the most effective of them. On this basis, the main direction of reducing the cutting temperature and improving the quality and productivity of processing is substantiated, which consists in reducing the maximum cutting temperature to the level and below the melting temperature of the material being processed. This makes it possible to carry out grinding with a significant machining capacity with virtually no increase in cutting temperature. It is shown that the main condition for reducing the maximum cutting temperature is to reduce the conditional cutting stress.

**Keywords:** heat balance, temperature criterion, quality and productivity of processing, conditional cutting stress, high-speed processing, part speed

**Вступ.** Підвищення якості обробки деталей машин є важливим чинником виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції та виходу промислових підприємств на міжнародні ринки. Значною мірою це відноситься до методів фінішної обробки деталей машин, де остаточно формуються параметри якості оброблюваного матеріалу. Найбільше застосування із фінішних методів механічної обробки отримав метод шліфування, який дозволяє поряд із забезпеченням високих показників якості досягти й значної продуктивності обробки. Тому розробленню ефективних технологічних процесів шліфування постійно приділяють значну увагу. При цьому важливими питаннями є управління тепловою напруженістю процесу шліфування та зниження температури різання для підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин. У зв'язку з цим у роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання теоретичного обґрунтування умов зменшення температури різання при шліфуванні.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** У науково-технічній літературі питанню зменшення температури різання при шліфуванні присвячені численні роботи [8; 10; 11; 13; 15]. Для цього у роботах [3; 4; 11] обґрунтовано вибір ефективних складів мастильно-охолоджуючих рідин. У ряді робіт обґрунтовано умови зниження тертя при шліфуванні шляхом реалізації різних фізичних ефектів. Так, у роботах [8; 13] показано ефективність введення в зону різання твердих мастил та застосування імпрегнації (спеціальної термічної обробки) шліфувальних кругів, у роботі [12] – застосування високопористих абразивних кругів, у роботах [2; 14] – застосування вібраційного та ультразвукового шліфування, у роботах [1; 2; 14] – алмазного шліфування. Серед цих робіт слід виділити роботи професора Якімова О. В. [13; 14], який запропонував нові теоретичні підходи до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення, розробив ефективний метод переривчастого шліфування, що дозволяє зменшити



температуру різання та підвищити якість обробки при одночасному забезпеченні високої продуктивності. Тому дана робота є подальшим розвитком наукового напрямку, який запропонував професор Якимов О. В. У ній розглядаються питання аналітичного визначення температури різання на основі балансу тепла, яке виділяється при шліфуванні та розповсюджується в оброблювану деталь і стружки, що утворюються. Це дозволяє більш об'єктивно підійти до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при шліфуванні й умов її зменшення та на цій основі встановлення шляхів підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- встановити аналітичні залежності для визначення основних параметрів теплового процесу при шліфуванні, включаючи температуру різання, та обґрунтувати умови її зменшення;
- теоретично обґрунтувати універсальний технологічний параметр процесу шліфування, що визначає його потенційні можливості та дозволяє вибирати найбільш раціональні умови обробки за температурним критерієм;
- теоретично обґрунтувати шляхи підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин за температурним критерієм;
- провести експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень.

**Матеріали дослідження.** Для теоретичного обґрунтування закономірностей формування температури різання при шліфуванні  $\theta$  слід скористатися математичною моделлю визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні, яку наведено в роботах [5-7; 9]. Вона враховує перерізання шліфувальним кругом адіабатичних стержнів та рух теплового джерела углиб поверхневого шару оброблюваної деталі на задану глибину шліфування  $t$  із швидкістю  $V_{piz} = t / \tau$  (де  $\tau$  – час перерізання адіабатичного стержня, с, рис. 1).

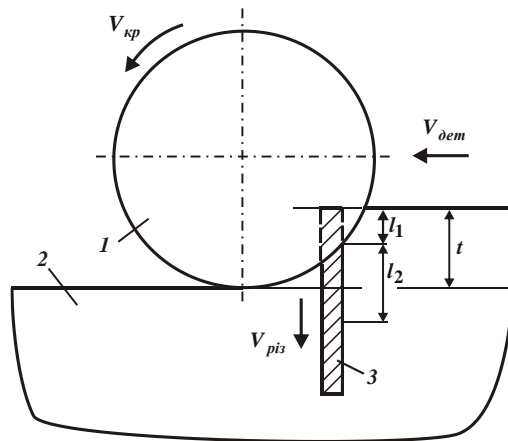


Рис. 1 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень ( $l_1$  – довжина зрізаної частини адіабатичного стержня;  $l_2$  – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі;  $V_{кр}$ ,  $V_{дем}$  – відповідно, швидкості круга і деталі)

Виходячи із цього, розрахунок температури різання  $\theta$  при шліфуванні виконано із урахуванням балансу тепла, яке надходить в стружки та в оброблювану деталь, тобто балансу тепла, що витрачається на нагрівання двох ділянок адіабатичного стержня з довжинами  $l_1$  та  $l_2$ . У результаті отримано рівняння:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{piz} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + \int_0^{\tau} \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot S^2}{N} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \cdot d\tau = N \cdot \tau, \quad (1)$$

яке після диференціювання всіх складових за часом  $\tau$  приймає вигляд:

$$c \cdot \rho \cdot V_{piz} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{piz}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{piz}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;

$c$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);

$\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$a = \lambda / c \cdot \rho$  – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$N = q \cdot S$  – потужність різання, Вт;

$q = \sigma \cdot V_{piz}$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа поперечного перерізу адіабатичного стержня, м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;

$V_{piz}$  – швидкість перерізання шліфувальним кругом адіабатичного стержня, м/с.

Рішення диференціального рівняння (2):

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{piz}^2}{\lambda} \cdot \tau}, \quad (3)$$

де  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – максимальна температура різання, град.

Для розкриття фізичної сутності залежності  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  розглянуто умову рівності роботи різання при шліфуванні  $A = P_z \cdot V_{кр} \cdot \tau$  та кількості тепла  $Q = c \cdot m \cdot \theta_{max}$ , яке виділяється в процесі різання та повністю переходить в стружки, що утворюються, де  $P_z = \sigma \cdot S_{сум}$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $S_{сум} = B \cdot V_{дет} \cdot t / V_{кр}$  – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу при шліфуванні всіма одночасно працюючими зернами круга, м<sup>2</sup> [7];  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с;  $m = \rho \cdot V$ ;  $V = B \cdot t \cdot l$  – відповідно, маса та об'єм матеріалу, що знімається за час  $\tau$ ;  $l = V_{дет} \cdot \tau$  – довжина переміщення шліфувального круга за час  $\tau$ , м.

Після математичних перетворень отримано:  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Цим доведено, що величина  $\theta_{max}$  є дійсно максимальною температурою різання, при якій все тепло, яке виділяється в процесі шліфування, повністю переходить в стружки, що утворюються.

Із залежності  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  випливає, що максимальна температура різання  $\theta_{max}$  цілком однозначно визначається умовним напруженням різання  $\sigma$ : чим менше  $\sigma$ , тим менше максимальна температура різання  $\theta_{max}$ . Зменшити умовне напруження різання  $\sigma$  можна підвищенням ріжучої здатності шліфувального круга та зниженням інтенсивності тертя в зоні різання. Виходячи із цього, максимальну температуру різання  $\theta_{max}$  слід розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає технологічні можливості не тільки методу шліфування, а й інших методів механічної обробки та дозволяє порівнювати їх за температурним критерієм і вибирати найбільш ефективні з них.

У разі дії на зону різання охолоджувальної рідини робота різання при шліфуванні  $A = P_z \cdot V_{кр} \cdot \tau$  буде дорівнювати різниці кількості тепла  $Q = c \cdot m \cdot \theta_{max}$ , яке виділяється в процесі різання та переходить в стружки, та кількості тепла, що відводиться охолоджувальною рідиною із зони різання  $Q_{охол.р.} = N_{охол.р.} \cdot \tau$ , де  $N_{охол.р.} = k \cdot N = k \cdot \sigma \cdot V_{piz}$  – інтенсивність відведення тепла охолоджувальною рідиною із зони різання, Вт;  $k < 1$  – частка тепла, що відводиться охолоджувальною рідиною із зони різання. Після математичних перетворень отримано:

$$\theta_{max} = \frac{\sigma \cdot (1 - k)}{c \cdot \rho}. \quad (4)$$

Як видно, чим більше величина  $k$ , тим менше максимальна температура різання  $\theta_{max}$ . Це принципове рішення, що показує, яким чином охолоджувальна рідина або інше технологічне середовище забезпечує зменшення температури різання  $\theta$  в результаті відведення тепла із зони різання. Виходячи із отриманої залежності, це досягається шляхом зменшення максимальної температури різання  $\theta_{max}$ . За певних умов охолодження зони різання максимальна температура різання  $\theta_{max}$  може стати менше температури плавлення оброблюваного матеріалу, що забезпечить здійснення шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання, яка в цьому разі може дорівнювати максимальній температурі різання  $\theta_{max}$ .

При плоскому шліфуванні з урахуванням відомої залежності  $V_{piz} = V_{дет} \sqrt{t / 2R_{кр}}$  залежність (3) прийме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{num}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}}. \quad (5)$$

де  $V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;

$R_{кр}$  – радіус круга, м;

$Q_{num} = V_{дет} \cdot t$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с.

На рис. 2 і в табл. 1 наведено значення параметрів теплового процесу при шліфуванні сталі ШХ15 ( $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), розраховані за залежністю (3) за умови  $V_{piz} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с. Як видно, зі збільшенням часу обробки  $\tau$  відношення  $\theta / \theta_{max}$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ .

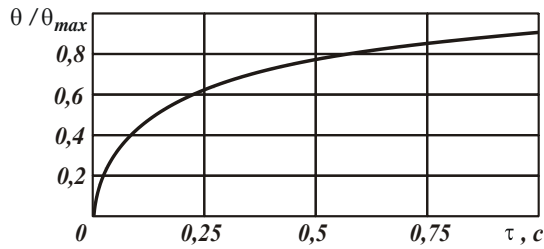


Рис. 2 – Залежність відношення  $\theta / \theta_{max}$  від часу обробки  $\tau$

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу шліфування

$\theta / \theta_{max}$	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
$(1 - \theta / \theta_{max}) \times e^{\theta / \theta_{max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$V_{риз}^2 \cdot \tau / a$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	$\infty$
$\tau, c$	0	0,0152	0,0833	0,2424	0,6136	1,061	$\infty$
$Q_{num} = 1000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,04	1,23	10,41	66,99	199,15	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	25,0	0,813	0,096	0,015	0,005	0
$Q_{num} = 2000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,01	0,3075	2,602	16,665	49,788	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	200,0	6,5	0,768	0,12	0,04	0
$Q_{num} = 4000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0025	0,0769	0,6505	4,1663	12,447	$\infty$
$V_{dem}, \text{ м/хв}$	$\infty$	1600	52	6,144	0,96	0,32	0

Виходячи із табл. 1, у діапазоні зміни відношення  $\theta / \theta_{max} = 0 \dots 0,4$  в залежності від  $Q_{num} = V_{dem} \cdot t$  ефективно на практиці застосовувати технологічний процес багатопрохідного шліфування периферією круга зі збільшеною швидкістю деталі та незначною глибиною шліфування. Також ефективно зменшувати максимальну температуру шліфування  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  за рахунок зменшення параметра  $\sigma$  шляхом зменшення тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом та підвищення різальної здатності круга.

У діапазоні зміни відношення  $\theta / \theta_{max} = 0,4 \dots 1,0$  ефективно застосовувати: технологічні процеси глибинного шліфування периферією круга із незначною швидкістю деталі та торцем круга із шириною шліфування, рівною діаметру круга; технологію розрізування матеріалів відрізним кругом; технологічні процеси фрезування циліндричною та торцевою фрезами, а також 3D-фрезування із шириною різання, рівною діаметру фрези.

Розрахунками встановлено, що частка тепла, яке надходить в стружки при шліфуванні, визначається виразом  $\alpha_1 = \theta / \theta_{max}$ , а частка тепла, яке надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, – виразом  $\alpha_2 = 1 - \theta / \theta_{max}$  (табл. 1, рис. 3).

За умови  $\theta / \theta_{max} \rightarrow 1$  фактично все тепло, що виділяється при шліфуванні сталі ШХ15 ( $V_{dem} = 15 \text{ м/хв}$ ), надходить в стружки. Для практичного здійснення цієї умови необхідно використовувати технології високошвидкісної обробки, які фактично виключають перенесення тепла, що утворюється при різанні, в поверхневий шар оброблюваної деталі та дозволяють підвищити якість та продуктивність обробки. Отже, використовуючи залежність (5), можна аналітично визначити кількість тепла, яке надходить в оброблювану деталь та в стружки. Це має велике практичне значення, оскільки при розрахунках температури різання характер розподілу тепла встановлюють на основі експериментальних даних, справедливих для конкретних технологічних умов обробки. У результаті не вдається в узагальненому вигляді визначити температуру різання в широких діапазонах зміни параметрів режиму різання, включаючи технології шліфування та лезової обробки.

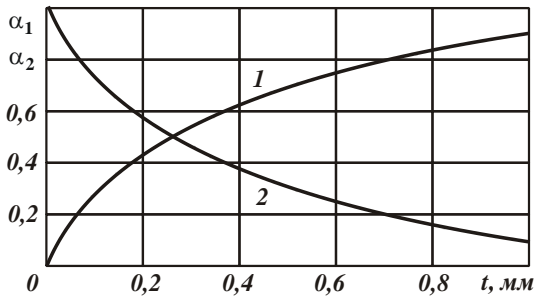


Рис. 3 – Залежності  $\alpha_1$  (1) та  $\alpha_2$  (2) від глибини шліфування  $t$

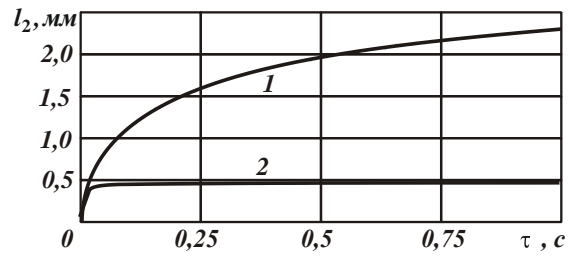


Рис. 4 – Залежність параметра  $l_2$  від часу  $\tau$  при шліфуванні сталі ШХ15: 1; 2 –  $V_{piz} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $16,65 \cdot 10^{-3}$  м/с

Розрахунками встановлено, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі визначається залежністю

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{piz}} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \quad (6)$$

та змінюється за законом зміни відношення  $\theta/\theta_{max}$  (рис. 4).

На основі отриманих результатів теоретично обґрунтовано умови розширення технологічних можливостей високопродуктивних методів шліфування за температурним критерієм. Виходячи із табл. 1, це досягається за рахунок застосування глибокого шліфування, оскільки при багатопрхідному шліфуванні зі збільшенням  $Q_{num}$  потрібно значно збільшувати  $V_{dem}$ , що не завжди можна здійснити. При глибокому шліфуванні також менше градієнт

температури  $\frac{\theta}{l_2} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{Q_{num}}{\sqrt{2t \cdot R_{kp}}}$  та більше параметр  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{kp}}}{Q_{num}}}$ , що вказує на можливість підвищення якості обробки.

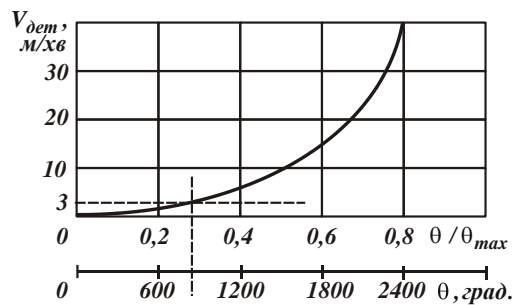


Рис. 5 – Залежність  $V_{dem}$  від  $\theta/\theta_{max}$  і  $\theta$

Для здійснення прогресивної технології зубшліфування за методом профільного копіювання розраховано швидкість деталі  $V_{dem}$  за вихідних даних: оброблюваний матеріал – сталь 18ХГН2МФБ;  $t = 0,4$  мм; температура різання  $\theta = 1000$  °С. Встановлено, що  $V_{dem} = 3$  м/хв. (рис. 5), тобто для здійснення цих умов обробки необхідно застосовувати технологію глибокого шліфування.

Для оцінювання достовірності отриманих теоретичних рішень проведено порівняння розрахункових та експериментальних значень параметрів теплового процесу  $\theta$ ,  $\theta_{max}$ ,  $\theta/\theta_{max}$  та  $l_2$  при плоскому шліфуванні сплаву ЖС6К ( $a = \lambda/(c \cdot \rho) = 3,73 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 16,6$  Дж/(м·с·град),  $c \cdot \rho = 4,46 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град)) із режимом різання:  $V_{dem} = 0,1$  м/с;  $t = 0,02$  мм;  $R_{kp} = 0,1$  м (рис. 6 [15]).

Як видно із рис. 6, при досягненні певної глибини проникнення тепла в поверхневий шар деталі, що відповідає параметру  $l_2$ , температура приймає найменше значення та в подальшому залишається незмінною. Для розрахунку параметра  $l_2$  за залежністю (6) необхідно знати відношення  $\theta/\theta_{max}$ , яке визначається за залежністю (3), в якій  $V_{piz} = t/\tau$ , де  $\tau = l/V_{dem} = \sqrt{2t \cdot R_{kp}}/V_{dem}$  – час контакту круга з оброблюваною деталлю, с;  $l = \sqrt{2t \cdot R_{kp}}$  – довжина контакту круга з оброблюваною деталлю, м. У результаті розрахунків за залежністю (3) із урахуванням  $\tau = 0,02$  с встановлено:  $\theta/\theta_{max} = 0,095$ . Відповідно, за залежністю (6) отримано:  $l_2 = 0,354$  мм.

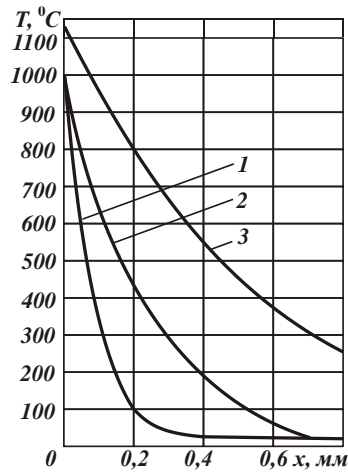


Рис. 6 – Температурне поле деталі із сплаву ЖС6К при різному тепловому стані зони контакту: 1 – із охолодженням; 2 – без охолодження; 3 – із попереднім підігрівом на 100 °С [15]

На рис. 7 графічно показано встановлені значення параметрів теплового процесу при шліфуванні.

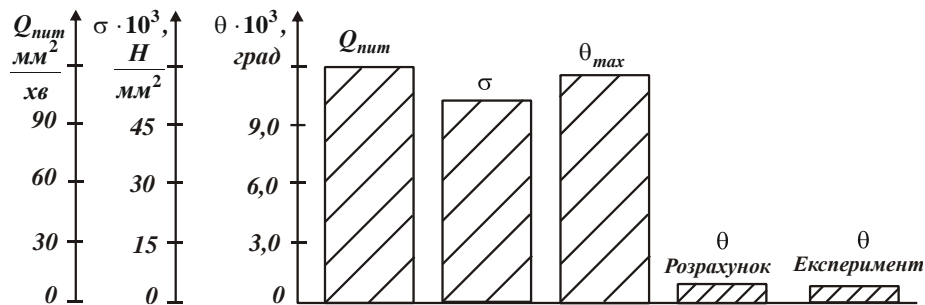


Рис. 7 – Значення параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні сплаву ЖС6К

Для визначення температури різання  $\theta$  за залежністю  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$  [7] необхідно знати щільність теплового потоку  $q$ . У роботі [15] наведено графіки експериментальних значень  $q$  для розглянутих умов обробки ( $V_{dem} = 0,1$  м/с;  $t = 0,02$  мм;  $R_{sp} = 0,1$  м), звідки встановлено  $q = 52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Після підстановки цих значень в залежність  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$ , отримано:  $\theta = 1109$  °С. Це розрахункове значення температури різання  $\theta$  на 11 % перевищує експериментальне значення  $\theta = 1000$  °С (рис. 7), що цілком прийнятно для практичних розрахунків та вказує на достовірність отриманого теоретичного рішення.

Максимальна температура різання  $\theta_{max}$  за умови  $\theta / \theta_{max} = 0,095$  дорівнює  $\theta_{max} = 11673,7$  °С. Цим встановлено, що максимальна температура різання  $\theta_{max}$  значно перевищує температуру плавлення оброблюваного металу. Тому питому продуктивність обробки  $Q_{num}$  можна збільшувати лише в межах збільшення температури різання  $\theta$  до температури плавлення оброблюваного металу, тобто до значення  $Q_{num} = V_{dem} \cdot t = 0,1 \cdot 10^3$  мм/с  $\cdot$  0,02 мм = 120 мм<sup>2</sup>/хв. Для визначення максимальної температури різання  $\theta_{max}$  слід скористатися залежністю  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Знаючи експериментальне значення щільності теплового потоку  $q = 52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, із урахуванням потужності шліфування  $N = \sigma \cdot Q$ , продуктивності обробки  $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$  (де  $B$  – ширина шліфування, м) можна аналітично визначити  $q$  та умовне напруження різання  $\sigma$ :

$$q = \frac{N}{B \cdot l} = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot l} = \frac{\sigma \cdot V_{dem} \cdot t}{l}, \text{ звідки } \sigma = \frac{q \cdot l}{V_{dem} \cdot t}.$$

Розрахунками встановлено (розмірність довжини – мм):  $\sigma = \frac{52 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 100}}{0,1 \cdot 10^3 \cdot 0,02} = 52 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>.

Як видно, умовне напруження різання  $\sigma$  приймає надзвичайно велике значення, що пов'язано із інтенсивним тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом (рис. 7).

Після підстановки значень  $\sigma = 52 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup> та  $c \cdot \rho = 4,46 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град) в залежність  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  маємо:  $\theta_{max} = 11660$  °С. Це значення несуттєво відрізняється від раніше встановленого іншим методом значення  $\theta_{max} = 11673,7$  °С, тобто справедливе відношення  $\theta / \theta_{max} = 0,095$ .

Таким чином встановлено, що наведені в роботі [15] умови шліфування дозволяють використати лише 9,5 %

теплого балансу процесу шліфування, який визначається, переважно, енергією тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом. Енергія процесу "чистого" різання складає незначний відсоток у тепловому балансі процесу шліфування. Слід зазначити, що подальше збільшення продуктивності обробки шляхом збільшення швидкості деталі  $V_{dem}$  або глибини шліфування  $t$  приведе до збільшення температури різання  $\theta$  та появи на оброблюваній поверхні температурних дефектів.

Параметр  $l_2$  також можна визначити за спрощеною залежністю  $l_2 = \sqrt{(2 \cdot \lambda \cdot \tau) / (c \cdot \rho)}$ . Із урахуванням  $\tau = 0,02$  с встановлено:  $l_2 = 0,386$  мм. Це значення параметра  $l_2$  несуттєво відрізняється від раніше встановленого іншим методом значення  $l_2 = 0,354$  мм. Також розраховані за залежностями (3) і  $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$  значення температури різання  $\theta$  відрізняються несуттєво від експериментально встановленого значення  $\theta = 1000$  °С (рис. 6). Це вказує на достовірність отриманих аналітичних залежностей. При цьому доведено, що розрахунки температури різання  $\theta$  можна виконувати за двома методами: на основі експериментальних значень щільності теплового потоку  $q$  та умовного напруження різання  $\sigma$ , оскільки в обох випадках отримано фактично однакові значення температури різання  $\theta$ .

Для більш повного аналізу наведеного в роботі теоретичного рішення проведено його оцінювання за результатами досліджень температури різання при плоскому шліфуванні, які отримані професором Якимовим О. В. [13]. Вихідні дані для розрахунку: оброблюваний матеріал – сталь 12Н2Н4А ( $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 16,6$  Дж/(м·с·град),  $c \cdot \rho = 5,57 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град). Режим різання:  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{dem} = 0,21$  м/с;  $t = 0,04$  мм;  $R_{кр} = 0,1$  м;  $Q_{num} = V_{dem} \cdot t = 0,21 \cdot 10^3$  мм/с · 0,04 мм = 504 мм<sup>2</sup>/хв. Щільність теплового потоку  $q = 57 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. За цими даними професор Якимов О. В. розрахунками (із урахуванням поправочних коефіцієнтів) встановив, що температура різання дорівнює 876 °С. Це значення температури різання погодиться зі встановленим експериментальним значенням.

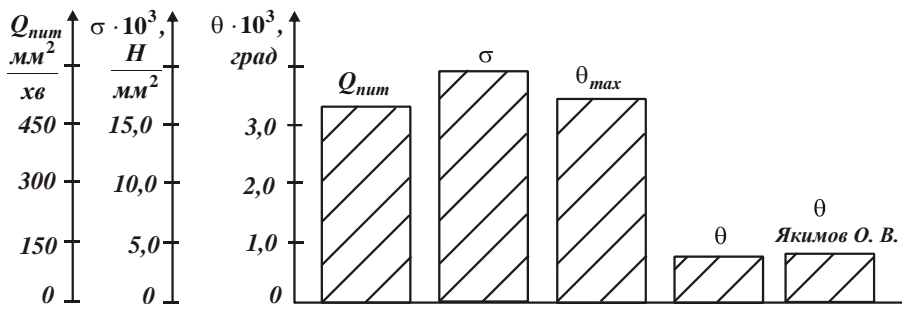


Рис. 8 – Значення параметрів теплового процесу при шліфуванні

Розрахунками параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні за залежністю (3) встановлено:  $\theta / \theta_{max} = 0,25$ . Умовне напруження різання  $\sigma$ , виходячи із залежності (8), дорівнює:  $\sigma = 19193$  Н/мм<sup>2</sup>. Тоді  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 3446$  °С. Відповідно, температура різання  $\theta = 0,25 \cdot \theta_{max} = 862$  °С.

Порівнюючи це значення зі значенням, встановленим професором Якимовим О. В. (яке дорівнює 876 °С), видно, що вони несуттєво відрізняються (в межах 2 %). Це вказує на достовірність отриманого в роботі теоретичного рішення, що аналітично описується залежністю (3). На рис. 8 графічно показано встановлені значення параметрів теплового процесу при шліфуванні.

**Висновки.** 1. У роботі розроблено теоретичний підхід до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення із урахуванням балансу тепла, що надходить в стружки та оброблювану деталь. Це дозволило наблизити розрахункову схему температури різання до реальних умов обробки й привести у відповідність теорію та практику механічної обробки шліфуванням. Розходження розрахункових та експериментальних значень температури різання при шліфуванні складає не більше 12 %.

2. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням часу контакту круга з оброблюваним матеріалом температура різання безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимальної температури різання, яка визначається відношенням умовного напруження різання до питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Виходячи з цього запропоновано максимальну температуру різання розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає його потенційні можливості та дозволяє порівнювати різні методи механічної обробки за температурним критерієм й вибирати найбільш ефективні з них. На цій основі обґрунтовано основний напрям зниження температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки, який полягає у зменшенні максимальної температури різання до рівня та нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це дозволяє здійснити шліфування зі значною продуктивністю обробки фактично без підвищення температури різання.

3. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням питомої продуктивності обробки ефективно шліфування здійснювати за схемою глибинного шліфування із відносно невеликою швидкістю деталі. При відносно невеликій питомій продуктивності обробки доцільно використовувати багатопрхідне шліфування зі збільшеною швидкістю деталі. Встановлено також, що в реальних умовах шліфування відношення заданої й максимальної температур шліфування може змінюватися лише в межах 0 ... 0,4 в зв'язку із перевищенням максимальною температурою різання температури плавлення оброблюваного матеріалу через значне збільшення умовного напруження різання при



шліфуванні. Тому основною умовою зменшення максимальної температури різання є зменшення умовного напруження різання.

#### Список літератури

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техника, 1980. – 212 с.
3. Ларшин В. П., Гречиха А. А. Проблемы применения смазывающе-охлаждающих средств в технике и технологии // Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 54–59.
4. Оборский Г. А., Дащенко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем: монография. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
5. Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Андiлахай А. А., Новиков Д. Ф., Полянский В. И. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Новиков Ф. В. Определение условий высокопроизводительного низкотемпературного шлифования // Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць // м. Луцьк, червень 2020. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – Випуск 16. – С. 92–99.
7. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
8. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 139 с.
9. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов. Високі технології в машинобудуванні: зб. наук, праць. – Харків, НТУ "ХПИ", 2018. Вип. 1 (28). С. 120–130.
10. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
11. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
12. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
13. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
14. Якимов А. В., Паршаков А. Н., Свирицев В. И., Ларшин В. П. Управление процессом шлифования. – К.: Техніка, 1983. – 182 с.
15. Ящерицын П. И., Цокур А. К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Baykalov A. K. Vvedeniye v teoriyu shlifovaniya materialov. – K.: Naukova dumka, 1978. – 207 s.
2. Zakharenko I. P. Almaznyye instrumenty i protsessy obrabotki. – K.: Tekhnika, 1980. – 212 s.
3. Larshin V. P., Grechikha A. A. Problemy primeneniya smazyvayushche-okhlazhdayushchikh sredstv v tekhnike i tekhnologii // Visnyk Kharkivs'koho derzh. tekhn. un-tu sil's'koho hospodarstva. – Kharkiv: KHDTUS-H, 2002. – Vyp. 10. – S. 54–59.
4. Oborskiy G. A., Dashchenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovaniye sistem: monografiya. – Odessa: Astroprint, 2013. – 664 s.
5. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Andilakhay A. A., Novikov D. F., Polyanskiy V. I. Sovremennyye tekhnologii i tekhnicheskoye perevooruzheniye predpriyatiy : monografiya. – Dnepr: LIRA, 2018. – 400 s.
6. Novikov F. V. Opredeleniye usloviy vysokoproizvoditel'nogo nizkotemperaturnogo shlifovaniya // Perspektivni tekhnolohiyi ta prylyady: zbirnyk naukovykh prats' // m. Luts'k, cherven' 2020. – Luts'k: Luts'kyu NTU, 2020. – Vypusk 16. – S. 92–99.
7. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya. – Dnepr: LIRA, 2018. – 400 s.
8. Ostrovskiy V. I. Teoreticheskiye osnovy protsessa shlifovaniya. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981. – 139 s.
9. Polyanskiy V. I. Matematicheskaya model' teplovogo protsessa pri shlifovanii materialov. Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni: zb. nauk, prats'. – Kharkiv, NTU "KHPI", 2018. Vyp. 1 (28). S. 120–130.
10. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energostal", 2016. – 448 s.
11. Sipaylov V. A. Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 166 s.
12. Starkov V. K. Shlifovaniye vysokoporistymi krugami. – M.: Mashinostroyeniye, 2007. – 688 s.
13. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s.
14. Yakimov A. V., Parshakov A. N., Svirshchev V. I., Larshin V. P. Upravleniye protsessom shlifovaniya. – K.: Tekhnika, 1983. – 182 s.
15. Yashcheritsyn P. I., Tsokur A. K., Yeremenko M. L. Teplovyie yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. – 184 s.

Поступила (received) 15.03.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilyvych)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua)  
ORCID: 0000-0001-6996-3356

**Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: [tools@imperija.com](mailto:tools@imperija.com), ORCID: 0000-0003-2841-9455



**ТИМОФЕЄВА Л.А., ВОЛОШИНА Л.В., ТИМОФЄЄВ С.С., ВОЛОШИН Д.І., КОЛЕСНИК М.А.**

## **МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ В УМОВАХ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ**

У роботі отримали подальший розвиток питання модифікації поверхні деталей машин та механізмів, які працюють в умовах тертя та зношування з мастилом та без. Розглянуто питання залежності антифрикційності і фрикційності від особливого стану лише поверхневих шарів деталей тертя. Виявлено, що саме структурні зміни, які відбуваються в повехневому мікрошарі спряжених матеріалів, утворення та руйнування вторинних структур відповідальні за характер вузла тертя. Авторами пропонується створення на поверхні тертя таких захисних покриттів, які мають властивості та механізм дії відповідний вторинним структурам аби мати можливість керувати явищами антифрикційності та фракційності в зоні тертя спряжених деталей. Поставлена мета дослідження досягається обробкою залізвуглецевих сплавів в середовищі перегрітої пари водних розчинів солей. Вибрано оптимальні параметри технологічного процесу формування покриттів при пароокисдуванні. Проведені лабораторні випробування різного хімічного складу утвореного покриття на триботехнічні властивості пари тертя. В ході проведення дослідження автори дійшли висновку, що встановивши якісну та кількісну залежність між складом оксидних покриттів та їх триботехнічними властивостями, можна змінювати тим самим умови вузла тертя від антифрикційності до фрикційності, використовуючи при цьому для виготовлення його деталей ті самі конструкційні матеріали – залізвуглецеві сплави. Таким чином, складні оксиди, які відрізняються за хімічним складом і будовою, що є покриттями на залізвуглецевих сплавах, можуть істотно впливати на термомеханофізичні процеси, які протікають при експлуатації та дозволяють їх реновацію в присутності мастильного матеріалу та без нього. Покриття утворені на поверхні залізвуглецевих сплавів відповідно до умов експлуатації можуть мати як фрикційні та і антифрикційні властивості.

**Ключові слова:** антифрикційні, фрикційні пари тертя, структура поверхні тертя, захисні покриття, насичуюче середовище, водний розчин солей, легуючі елементи, оксидні покриття, знос, триботехнічні властивості

**TIMOFEEVA L.A., VOLOSHYNA L.V., TIMOFEEV S.S., VOLOSHYN D.I., KOLESNYK M.A.**

## **SURFACE MODIFICATION OF MACHINE PARTS AND MECHANISMS IN THE CONDITIONS OF FRICTION AND WEAR**

The issues of surface modification of machine parts and mechanisms in conditions of friction and wear with and without oil further develops that work. The dependence of antifricition and friction on the special state of only the surface layers of friction parts is considered. It is revealed that the structural changes that occur in the surface microlayer of conjugate materials, the formation and destruction of secondary structures are responsible for the nature of the friction node. The authors propose to create on the friction surface such protective coatings that have properties and mechanism of action corresponding to secondary structures in order to be able to control the phenomena of antifricition and fractionality in the friction zone of conjugate parts. The aim of the study is achieved by processing iron-carbon alloys in the environment of superheated steam of aqueous solutions of salts. The optimal parameters of the technological process of forming coatings during vapor oxidation are selected. Laboratory tests of different chemical composition of the formed coating on the tribotechnical properties of friction steam were carried out. During the study, the authors concluded that by establishing a qualitative and quantitative relationship between the composition of oxide coatings and their tribotechnical properties, it is possible to change the conditions of the friction unit from antifricition to friction, using the same structural materials - ferroc carbon alloys. Thus, complex oxides, which differ in chemical composition and structure, which are coatings on ferroc carbon alloys, can significantly affect the thermomechanophysical processes that occur during operation and allow their renovation in the presence of lubricant and without it. Coatings formed on the surface of ferroc carbon alloys in accordance with the operating conditions can have both friction and antifricition properties.

**Keywords:** antifricition, friction pairs, friction surface structure, protective coatings, saturating medium, aqueous salt solution, alloying elements, oxide coatings, wear, tribotechnical properties

**ТИМОФЕЄВА Л.А., ВОЛОШИНА Л.В., ТИМОФЕЄВ С.С., ВОЛОШИН Д.І., КОЛЕСНИК М.А.**

## **МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ В УМОВАХ ТРЕННЯ І ЗНОСА**

В работе получили дальнейшее развитие вопросы модификации поверхности деталей машин и механизмов, работающих в условиях трения и износа со смазкой и без. Рассмотрены вопросы зависимости антифрикционности и фрикционности от особого состояния только поверхностных слоев деталей трения. Выведено, что именно структурные изменения, происходящие в поверхностном микрослое сопряженных материалов, образование и разрушение вторичных структур, отвечают за характер узла трения. Авторами предлагается создание на поверхности трения таких защитных покрытий, которые обладают свойствами и механизмом действия, соответствующим вторичным структурам, чтобы иметь возможность управлять явлениями антифрикционности и фрикционности в зоне трения сопряженных деталей. Поставленная цель исследования достигается обработкой железоуглеродистых сплавов в среде перегретого пара водных растворов солей. Выбраны оптимальные параметры технологического процесса формирования покрытий при пароокисдувании. Проведены лабораторные испытания разного химического состава образованного покрытия на триботехнические свойства пары трения. В ходе проведения исследования авторы пришли к выводу, что установив качественную и количественную зависимость между составом оксидных покрытий и их триботехническими свойствами, можно изменять тем самым условия узла трения от антифрикционности до фрикционности, используя при этом для изготовления его деталей те же конструкционные материалы – железоуглеродистые сплавы. Таким образом, сложные оксиды, отличающиеся по химическому составу и строению, являющиеся покрытиями на железоуглеродистых сплавах, могут оказывать существенное влияние на термомеханофизические процессы, протекающие при эксплуатации и позволяющие их реновацию в присутствии смазочного материала и без него. Покрытия образованные на поверхности железоуглеродных сплавов в соответствии с условиями эксплуатации могут обладать как фрикционными, так и антифрикционными свойствами.

**Ключевые слова:** антифрикционные, фрикционные пары трения, структура поверхности трения, защитные покрытия, насыщающая среда, водный раствор солей, легирующие элементы, оксидные покрытия, износ, триботехнические свойства

**Вступ.** Існує кілька гіпотез щодо концепції антифрикційності та фрикційності вузлів тертя [1, 2]. Протягом тривалого періоду вважалося, що вирішити проблему створення антифрикційних або фрикційних пар тертя можна тільки за рахунок підбору спеціальних конструкційних матеріалів, що мають відповідну структуру та властивості. Триботехнічні характеристики, таким чином, безпосередньо ставилися у залежність від співвідношення твердих та м'яких структурних складових сплавів, яке змінювалося шляхом легування або мікролегування тими або іншими елементами. Такий висновок став результатом спільної співпраці металознавців та фахівців у галузі тертя та зношування.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** Багатьма дослідженнями були отримані дані про можливість зміни

коефіцієнта тертя і зносостійкості при випробуванні тих самих поєднань матеріалів завдяки використанню різних мастил, що містять багатофункціональні присадки [2,3]. Ефективність присадок залежить від температури мастила, яка в об'ємі значно нижча, ніж у зоні тертя. Разом з тим, присадка, що знаходиться в мастилі, повинна бути інертною по відношенню до поверхні металу, але по мірі досягнення в зоні контакту певної (критичної) температури, що свідчить про можливість порушення нормального процесу зношування, починають протікати реакції між присадкою і металом, що сприяють утворенню, поряд із звичайними оксидами, специфічних захисних плівок.

За своїм призначенням присадки можуть бути антифрикційними, фрикційними, протизносними, протизадирними. За хімічним складом вони, як правило, є сіркофосфоровмісними сполуками. Ефективність та факт їх дій залежать, крім температури, від матеріалу спряжених деталей, адсорбційної активності та інших факторів. Однак основна складність полягає в тому, що забезпечити своєчасну доставку присадки, з урахуванням її малої концентрації, в зону тертя, де зароджуються відхилення від нормального процесу зношування, вдається далеко не завжди.

Незважаючи на це, з погляду практики, технологія створення антифрикційних та фрикційних вузлів тертя дещо полегшилася, хоча сама природа цих протилежних явищ залишалася неясною. У той самий час дедалі чіткіше стверджувалася необхідність запровадження науку про тертя поняття «тріада тертя», що враховує потрібне поєднання: матеріал-мастило-матеріал.

Новим імпульсом у розвитку трибології послужили дані про залежність характеристичних параметрів ідентичних матеріалів, що труться, і мастила від навантажувально-швидкісних режимів їх експлуатації [1,3].

Розкриття механізму явища, які відбуваються на поверхні тертя, дозволило металознавцям спільно з фахівцями в галузі триботехніки дійти висновку про залежність антифрикційності і фрикційності від особливого стану поверхневих шарів деталей тертя. Саме структурні зміни, що відбуваються в мікрошарі спряжених матеріалів, утворення та руйнування, так званих, вторинних структур відповідальні за характер вузла тертя.

Вторинні структури поділяються на два типи. Для забезпечення умови антифрикційності вузла тертя найбільш сприятливим поєднанням є наявність на поверхні тертя структур першого та другого типу. У разі появи на поверхнях тертя тільки одного виду вторинних структур, насамперед другого типу, пара тертя працює в режимі фрикційності.

Механізм управління утворенням того чи іншого типу вторинних структур пов'язується як із хімічним складом конструкційних матеріалів і мастильних засобів, так і з необхідною для цього величиною роботи [1]. Таким чином, введено нове поняття – структурна пристосованість пар тертя, і зв'язок її зі станом вузла тертя саме по собі вже охоплює досить широкий спектр факторів – навантаження, швидкість ковзання, мастило, матеріал спряження. Тільки при певному їх поєднанні досягається необхідний ефект.

У світовій практиці розроблено ряд методів підвищення триботехнічних властивостей матеріалів, за рахунок формування поверхневих шарів, які впливають на антифрикційність та фрикційність вузлів тертя. [4-6] Однак, як показала практика, ці методи не забезпечують необхідну зносостійкість. Тому ведуться дослідження, пов'язані з розробкою нового методу поверхневого зміцнення, який би забезпечував підвищення експлуатаційних характеристик поверхонь пар тертя. Особливу увагу приділяють тим методам та способам, які забезпечують не тільки досягнення заданих властивостей, але й гарантують екологічну чистоту технологічного процесу.

Аналіз методів [7-9], що використовуються для зміцнення робочої поверхні, показує, що вони трудомісткі, тривалі, вимагають застосування шкідливих і дефіцитних хімікатів і складного устаткування. Так, наприклад, поверхневі шари, отримані при азотуванні, підвищують зносостійкість, але погано припрацьовуються через високу твердість, що приводить до викришування азотованого шару в процесі експлуатації. При фосфатуванні поліпшується припрацьовуваність, але не забезпечується необхідної зносостійкості чавуна. Сульфидування гарантує чавуніві антифрикційні властивості, але ці шари не можуть тривалий час протистояти високим навантаженням, при яких працюють безліч деталей.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є формування на поверхні залізвуглецевих сплавів захисних покриттів, що наближені за своєю структурою та властивостями до вторинних структур, які з'являються в процесі тертя і сприяють підвищенню працездатності поверхневого шару деталей, а також за необхідності забезпечують антифрикційні або фрикційні властивості спряження деталей.

Для досягнення цієї мети необхідно:

дослідити вплив комплексної обробки з дифузійним насиченням поверхні в середовищі водяної пари декількома елементами на триботехнічні властивості залізвуглецевих сплавів;

визначити раціональні параметри технологічного процесу окислення, а саме час витримки, концентрація насичуючого середовища, температура, що забезпечать підвищення зносостійкості деталей;

визначити вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості, а саме зносостійкість, антифрикційні або фрикційні властивості.

**Матеріали дослідження.** В останні роки успішно розвивається новий напрямок у вирішенні проблеми створення антифрикційних або фрикційних пар тертя [1,10]. Передбачається утворення на поверхні тертя деталей, виготовлених із залізвуглецевих сплавів, штучних захисних плівок на кшталт вторинних структур, які докорінно змінюють, порівняно з вихідним матеріалом, триботехнічні властивості пари тертя. Досягається це обробкою залізвуглецевих сплавів у перегрітій парі водного розчину солей, внаслідок чого на чистій металевій поверхні утворюється шар простих або складних оксидів, мікролегованих елементами, що входять як у сплав, так і насичує парогазове середовище. [10-14]

Керуючи складом джерел легуючих елементів, можна створювати вторинні структури, що мають антифрикційні або фрикційні властивості. У кожному конкретному випадку вибір тих чи інших солей для насичуючого середовища

визначається поставленим завданням, тобто необхідністю отримання антифрикційної або фрикційної пари, а також прогнозом про триботехнічні властивості утворених при цьому хімічних сполук твердих розчинів.

Покриття формується на основі зустрічної дифузії - ефект Кіркендалла [15]. Особливістю формування таких покриттів є те що, структура покриття складається з декількох зон (рис.1):

1 зона – утворюється безпосередньо біля матриці і складається з хімічних елементів, що входять до складу матриці. Беручи до уваги дані рентгеноспектрального аналізу її склад можна інтерпретувати як суміш оксидів заліза.

2 зона – синтезована зона компонентів зони 1 і 3. Має явно виражену кристалічну будову і характеризується певною направленістю – стовбчаста структура.

3 зона – містить хімічні елементи, що входять до складу насичуючого середовища. Ця зона має крупнозернисту рівновісну структуру [15].

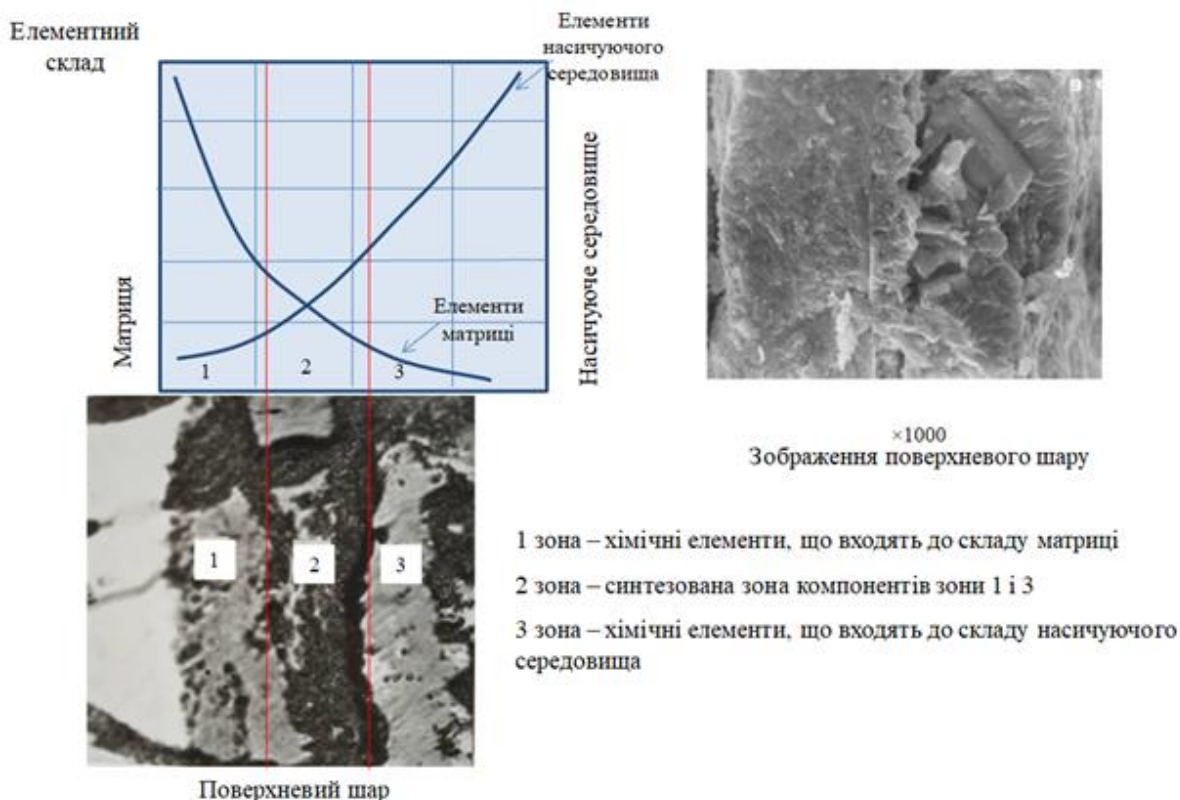


Рис.1 – Схема механізму формування покриття із водного розчину солей

Такі покриття характерні для залізвуглецевих сплавів, але більш наглядно виявлено на чавунах з різною формою графіту, наприклад, пластинчатою (рис.2). Експерименти проводилися на лабораторних зразках, виготовлених із сірого чавуну та використовуваних для подальших зносних випробувань на машині тертя СМЦ-2 за схемою колодка-диск. Структура чавуну перлітно-феритна (П70). Хімічний склад чавуну (маса, %): С – 2,1%; Si – 2,2%; Mn – 0,80%; P – 0,04%; S – 0,08%; Cr – 0,02%; N – 0,03%; решта Fe.

Встановлено, що основними параметрами технологічного процесу дифузійного насичення із водного розчину солей є температура обробки деталей, концентрація солі у водному розчині та час витримки в насичуючому середовищі. Від цих параметрів залежить формування поверхневого шару, а також його триботехнічні властивості. Виконана оптимізація параметрів технологічного процесу, що дозволило визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можливо досягти найкращих експлуатаційних та триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу приробітки, витримки максимального навантаження до утворення задирів. [16-17]

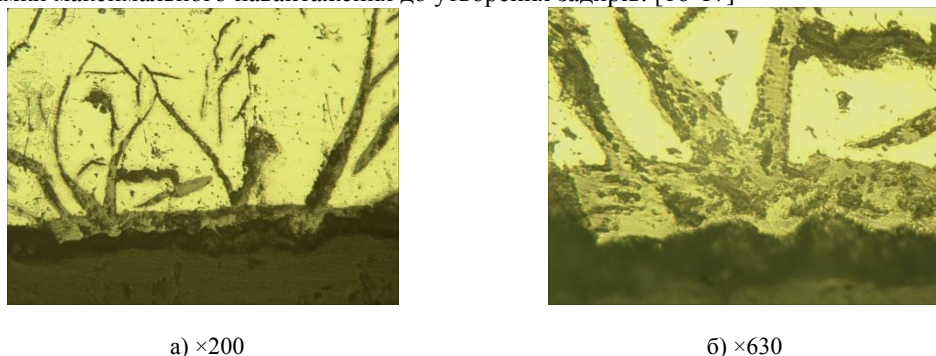


Рис.2 – Мікроструктура покриття на чавуні

Чавунні зразки однакового хімічного складу піддавалися хіміко-термічній обробці при суворому дотриманні наступних її параметрів: температура –  $620 \pm 10^\circ\text{C}$ , (температура завантаження та вивантаження зразків складала  $350^\circ\text{C}$ ), тривалість насичення – 60 хв, швидкість подачі розчину – 3 краплі/хв. Вирівнювався лише хімічний склад насичуючого середовища шляхом дослідження в кількості наступних солей: NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ .

Випробування зразків на зношування проводилися на машині тертя за наступним режимом:

швидкість ковзання – 1,04 кг/с;

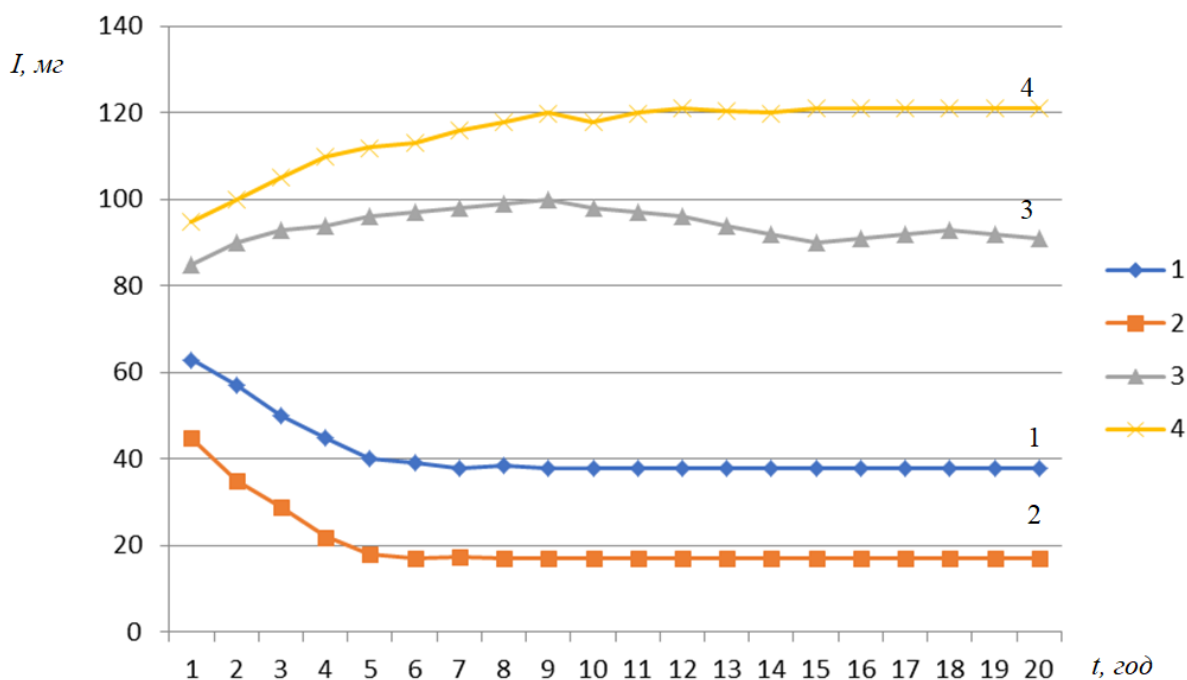
припрацювання – 1 година при тиску 0,7 МПа;

робоче навантаження – 50 кг (тиск 2,5 МПа);

тривалість випробування – 102 год;

змащування зануренням у мастило МГ-8 (обсяг мастила – 150).

Втрату маси визначали шляхом зважування зразків через кожні шість годин на аналітичних терезах. При втраті маси колодок та дисків обчислювали інтенсивність поверхневого руйнування матеріалу покриттів на основі сірого чавуну. За допомогою термометра вимірювали об'ємну температуру мастила. Усереднені дані, що відображають залежність інтенсивності сумарного зносу від тривалості випробування сірого чавуну з різними захисними покриттями, наведено на рисунку 3.



1 – вихідна; 2 –  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ; 3 – NaCl; 4 –  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$

Рис.3 – Залежність інтенсивності сумарного зносу спряженої пари від тривалості випробування сірого чавуну з різними захисними покриттями

Слід зазначити, що оксидні покриття, які відрізняються за хімічним складом, на сірому ідентичному чавуні по-різному впливають на його триботехнічні властивості. Так, наприклад, сірковмісне покриття (рис.3, крива 2) знижує в порівнянні з вихідними зразками (рис.3, крива 1) об'ємну температуру мастила, а також, як наслідок, коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу. І навпаки, хлор- або фосфоровмісне покриття відповідає різкому посиленню тепловиділення пар тертя – об'ємна температура мастила. Зносостійкість при цьому суттєво знизилася, особливо у перші години випробувань (рис.3, криві 3, 4).

Порівнюючи триботехнічні характеристики пар тертя з різними покриттями, можна помітити, що хімічний склад їх докорінно змінює умови тертя – від антифрикційності до фрикційності.

На думку авторів, механізм такого покриття полягає у процесі чистого парооксидування залізвуглецевих сплавів: залежно від температури на поверхні тертя виникають різні оксиди заліза [3, 4]. Відомо, що при температурі  $600^\circ\text{C}$  і вище оксидний шар складається з в'юстити ( $\text{FeO}$ ), який прилягає безпосередньо до основного металу. Далі розташовані оксиди  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , загальний вміст яких становить приблизно 5...10%. В'юстит характеризується найнижчою мікротвердістю, але високою щільністю і міцністю зв'язку з основним металом, оскільки має однакову з ним кристалічну (кубічну решітку) будову.

Природні властивості оксидів заліза, особливо в'юститної фази  $\text{FeO}$ , можуть змінюватися, якщо і в залізвуглецевій основі містяться легуючі елементи (Cr, Al та ін.). Ця ж закономірність спостерігається і в наявності зазначених елементів у насичуючому середовищі, яким є перегріта пара водного розчину солей. У цьому випадку

оксиди набувають і більш складнішу будову типу шпинелів (наприклад:  $\text{FeO} \times \text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ ), або має місце ущільнення іонних решіток оксидів за рахунок різних іонів насичуючого середовища. У нашому випадку з використанням насичуючого середовища це наявність Cl, S, P, Na та ін., які утворюють тверді розчини.

**Висновки.** В ході проведення дослідження автори дійшли висновку, що встановивши якісну та кількісну залежність між складом оксидних покриттів та їх триботехнічними властивостями, можна змінювати тим самим умови вузла тертя від антифрикційності до фрикційності, використовуючи при цьому для виготовлення його деталей ті самі конструкційні матеріали – залізвуглецеві сплави.

Таким чином, складні оксиди, які відрізняються за хімічним складом і будовою, що є покриттями на залізвуглецевих сплавах, можуть істотно впливати на термомеханофізичні процеси, які протікають при експлуатації та дозволяють їх реновацію в присутності мастильного матеріалу та без нього. Тобто покриття утворені на поверхні залізвуглецевих сплавів відповідно до умов експлуатації можуть мати як фрикційні та і антифрикційні властивості.

#### Список літератури:

1. Костецкий Б.И. Носовский И.Г. Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ.ред. Костецкого Б.И. – Киев: Техніка, 1976. –296 с.
2. Виноградова И.Э. Противоизносные присадки к маслам. – М.: Химия, 1972.– С. 272.
3. Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Пащенко М. І., Корбут С. В. Трибологія. К. : Вид-во НАУ, 2009. 392 с
4. Овчаров В.П. Влияние окисных пленок, полученных обработкой в атмосфере пара на трение и поверхностное упрочнение чугуна // Физико-химическая механика металла. 1973. № 2. С. 18 -21
5. Medvedovski E., Dudziak T. Protective coatings for high-temperature steam oxidation in coal-fired power plants. *Surface and Coatings Technology*, 2019. Vol. 369. P. 127-141.
6. Shewmon P. Diffusion in solids. Springer, 2016. 245 p
7. Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Федченко Л.Л., Демин А.Ю. Повышение износостойкости восстановленных деталей транспортных двигателей // Трение и износ. Сборник научных трудов. Том 37. №6. Гомель: ИММС НАН Беларуси. 2016. С. 699-704.
8. Тимофеева Л.А., Геворкян Е.С. Повышения качества подготовки поверхностей изделий транспортного назначения при их восстановлении // Вестник сертификации железнодорожного транспорта, 2013. - №3/1. – С.68-69.
9. Волошина Л.В. Функціональні покриття для підвищення зносостійкості деталей масляного шестеренного насосу. //Матеріали II-ої міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 27-29 квітня 2021 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 167 – 169.
10. Тимофеева Л.А., Устенко О.В., Цап О.І., Волошина Л.В. Підвищення експлуатаційних показників фрикційних клинів шляхом формування покриттів зі спеціальними властивостями // Збірник наукових праць УкрДУЗТ, Харків : УкрДУЗТ. 2019. Випуск 185. С.88 – 95. (НБД Index Copernicus)
11. Ananth S., Udaya Prakash J., Moorthy T. V., Hariharan P. Optimization of Wear Parameters for Grey Cast Iron under Different Conditions using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2018. Vol. 5, Iss. 2, Part 2. P. 7346-7354.
12. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Комплексні дослідження при розробці технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу. „Інтелектуальні транспортні технології” Матеріали I-ї міжнародної науково-технічної конференції, 24-30 січня 2020р. Трускавець-Харків: УкрДУЗТ.2020. С.116-117.
13. Волошина Л.В., Цап О.І. Дослідження впливу захисних покриттів на експлуатаційні показники фрикційних клинів гасників коливань візків вантажних вагонів// Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Матеріали 20-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – Київ: АТМ України, 2020. С.28-30.
14. Комарова Г.Л., Волошина Л.В., Цап О.І. Підвищення трибологічних властивостей чавуну комплексною обробкою. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару*, 15–19 березня 2021 р., м. Львів. – Київ: АТМ України, 2021. С.44-45.
15. Волошина Л.В. Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигунів. Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн.-х н-к за спец. 05.02.01 «Матеріалознавство»(132 Матеріалознавство). Український державний університет залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021. 195с.
16. Тимофеева Л. А., Тимофеев С. С., Волошина Л. В., Колесник М. А. Підвищення трибологічних властивостей поверхневого шару чавуну за допомогою оброблення в середовищі перегрітої пари водяного розчину солей. *Вісник ХНАДУ*, вип. 94, 2021. С.123-127. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.123
17. Волошина Л.В., Волошин Д.І., Карпенко Є.Р. Дослідження експлуатаційних показників масляних шестеренних насосів ДВЗ. *Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 15–16 червня 2022 р.* – Київ: АТМ України, 2022. С.29 – 31

#### Bibliography (transliterated):

1. Kostetskiy B.Y. Nosovskiy Y.H. Karaulov A.K. Poverkhnostnaia prochnost materyalov pry trenyy / Pod obshch.red. Kostetskoho B.Y. – Kyuev: Tekhnika, 1976. –296 s.
2. Vynogradova Y.E. Protivoiznosnie prysadky k maslam. – M.: Khymyia, 1972.– S. 272.
3. Kindrachuk M. V., Labunets V. F., Pashchenko M. I., Korbut Ye. V. Trybolohiia. K. : Vyd-vo NAU, 2009. 392 s
4. Ovcharov V.P. Vliyanye oksynykh plenok, poluchennykh obrabotkoi v atmosfere para na trenye i poverkhnostnoe uprochnenye chuhuna // Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka metalla. 1973. № 2. S. 18 -21
5. Medvedovski E., Dudziak T. Protective coatings for high-temperature steam oxidation in coal-fired power plants. *Surface and Coatings Technology*, 2019. Vol. 369. P. 127-141.
6. Shewmon P. Diffusion in solids. Springer, 2016. 245 p
7. Tymofeieva L.A., Tymofeiev S.S., Fedchenko L.L., Demin A.Iu. Povyshenye yznosostoikosty vosstanovlennykh detalei transportnykh dvyhatelei // Trenye y yznos. Sbornyk nauchnykh trudov. Tom 37. №6. Homel: YMMS NAN Belarusy. 2016. S. 699-704.
8. Tymofeieva L.A., Hevorkian E.S. Povysheniya kachestva podgotovky poverkhnosti yzdeleyi transportnoho naznacheniya pry ykh vosstanovlenyy // Vestnyk sertyfykatsyy zheleznodorozhnogo transporta, 2013. - №3/1. – S.68-69.
9. Voloshyna L.V. Funktsionalni pokryttia dlia pidvyshchennia znosostiikosti detalei maslianooho shesterennooho nasosu. //Materialy II-oi mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii «Інтелектуальні транспортні технології», Kharkiv, 27-29 kvitnia 2021 r.: Tezy dopovidei. Kharkiv: UkrDUZT, 2021. S. 167 – 169.
10. Tymofeieva L.A., Ustenko O.V., Tsap O.I., Voloshyna L.V. Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh pokaznykiv fryktsiinykh klyniv shliakhom formuvannia pokryttiv zi spetsialnymy vlastyvostiamy // Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT, Kharkiv : UkrDUZT. 2019. Vypusk 185. S.88 – 95. (NBD Index Copernicus)
11. Ananth S., Udaya Prakash J., Moorthy T. V., Hariharan P. Optimization of Wear Parameters for Grey Cast Iron under Different Conditions using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2018. Vol. 5, Iss. 2, Part 2. P. 7346-7354.

12. Tymofeieva L.A., Voloshyna L.V. Kompleksni doslidzhennia pry rozrobtsi tekhnolohichnoho protsesu pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei detalei maslianoho shesterennoho nasosu, „Intelektualni transportni tekhnolohii” Materialy 1-yi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 24-30 sichnia 2020r. Truskavets-Kharkiv: UkrDUZT.2020. S.116-117.
13. Voloshyna L.V., Tsap O.I. Doslidzhennia vplyvu zakhysnykh pokryttiv na ekspluatatsiini pokaznyky fryktsiinykh klyniv hasnykiv kolyvan vizkiv vantazhnykh vahoniv// Kachestvo, standartyzatsiia, kontrol: teoriia y praktyka: Materialy 20-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 07–11 veresnia 2020 r., m. Odesa. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2020. S.28-30.
14. Komarova H.L., Voloshyna L.V., Tsap O.I. Pidvyshchennia trybolohichnykh vlastyvostei chavunu kompleksnoi obrobkoiu. Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovo-tekhnichnoho seminaru, 15–19 bereznia 2021 r., m. Lviv. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2021. S.44-45.
15. Voloshyna L.V. Pidvyshchennia znosostiikosti maslianykh shesterennykh nasosiv traktornykh dyzelynykh dvyhuniv. Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia kand. tekhn.-kh n-k za spets. 05.02.01 «Materialoznavstvo»(132 Materialoznavstvo). Ukrainskyi derzhavnyi universytet zaliznychnoho transportu, Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Kharkiv, 2021. 195s.
16. Tymofeieva L. A., Tymofeiev S. S., Voloshyna L. V., Kolesnyk M. A. Pidvyshchennia trybolohichnykh vlastyvostei poverkhnevoho sharu chavunu za dopomohoiu obroblennia v seredovyskhi perehritoi pary vodianoho rozchynu solei. Visnyk KhNADU, vyp. 94, 2021. S.123-127. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.123
17. Voloshyna L.V., Voloshyn D.I., Karpenko Ye.R. Doslidzhennia ekspluatatsiinykh pokaznykiv maslianykh shesterennykh nasosiv DVZ. Inzheneriia poverkhi ta renovatsiia vyrobiv: Materialy 22-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 15–16 chervnia 2022 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2022. S.29 – 31

*Поступила (received) 17.06.2022*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Тимофеева Лариса Андріївна (Тимофеева Лариса Андреевна, Timofeeva Larisa Andreevna)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри "Інженерія вагонів та якість продукції" Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків; тел.: +38 (057) 730-10-49; e-mail: mtv@kart.edu.ua ORCID: 0000-0001-7210-3760

**Волошина Людмила Володимирівна (Волошина Людмила Владимировна, Voloshyna Liudmyla Volodymyrivna)** – кандидат технічних наук, асистент кафедри "Інженерія вагонів та якість продукції" Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків; тел.: +38 (057) 730-10-50; e-mail: ludmivol@gmail.com ORCID: 0000-0003-2039-111X

**Тимофеев Сергій Сергійович (Тимофеев Сергей Сергеевич, Timofeev Sergey Sergeevich)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Інженерія вагонів та якість продукції" Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків; тел.: +38 (057) 730-10-49; e-mail: mtv@kart.edu.ua ORCID: 0000-0001-7630-5467

**Волошин Дмитро Ігорович (Волошин Дмитрий Игоревич, Voloshyn Dmytro Igorovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри "Інженерія вагонів та якість продукції" Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків; тел.: +38 (057) 730-10-35; e-mail: dmivol777@gmail.com ORCID: 0000-0003-4735-5207

**Колесник Максим Анатолійович (Колесник Максим Анатолиевич, Kolesnyk Maksym Anatoliiovych)** – аспірант кафедри "Інженерія вагонів та якість продукції" Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків; тел.: +38 (057) 730-10-50; e-mail: mtv@kart.edu.ua ORCID: 0000-0003-7745-4357

**ЮРКОВЕЦЬ В.І., ВИСЛОУХ С.П., АНТОНЮК В.С.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ СКЛАДАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Для забезпечення надійності і точності виробів представлено метод автоматизованої побудови послідовності складання високоточних вісесиметричних виробів. Метою роботи є перевірка прийнятності використання орієнтованого графа складання, що включає матриці суміжності та інцидентності, для структурування та планування теоретичної схематизації технологічного процесу складання. Розглянутий метод збігається з можливою математичною реалізацією задачі. Оцінено специфіку конструкційного моделювання та процесу складання математичними методами. Розглянуто техніку створення графіків, що відображає взаємозв'язок між деталями та процесом складання. Вирішення задачі автоматизованого процесу складання виконується за допомогою алгоритмів та обчислювального програмного забезпечення на основі графіків, побудованих у матричному вигляді. Досягнуті результати дають можливість в режимі реального часу коригувати послідовність складання виробів, на основі чого з'являється можливість відстежувати параметри та контролювати прийняття рішень при плануванні процесів складання.

**Ключові слова:** математичне моделювання, вісесиметричні деталі, автоматизація складання, схематизація процесу складання, матриці суміжності і інцидентцій.

**YURKOVETS V.I., VISLOUKH S.P., ANTONYUK V.S.**

### **THE ASSEMBLY SEQUENCE OF AXISYMMETRIC DETAILS SIMULATION**

To ensure the reliability and accuracy of products, an automated construction method for the assembly sequence of high-precision axisymmetric products is presented. The work purpose is to verify the acceptability of using an oriented assembly graph, which includes adjacency and incidence matrices, for structuring and planning the theoretical schematization of the assembly technological process. The considered method coincides with a possible mathematical implementation of the problem. The specifics of structural modeling and the assembly process using mathematical methods were assessed. The technique of creating graphs reflecting the relationship between details and the assembly process is considered. Solving the tasks of the automated assembly process is performed using algorithms and computer software based on graphs constructed in matrix form. The achieved results make it possible to adjust the sequence of products assembly in real-time mode, based on which it becomes possible to monitor parameters and control decision-making when planning assembly processes.

**Keywords:** mathematical modeling, axisymmetric parts, automation of assembly, schematization of the assembly process, adjacency and incidence matrices.

**Вступ.** Проектування технологічного процесу складання виробів включає два етапи [1]. Перший етап – це генерація складальної схеми та технологічного процесу складання, що містить інформацію про порядок кріплення елементів виробу, комплектність складальних одиниць та монтажного з'єднання. Другий етап – це генерація операцій, визначення складу елементів, що приєднуються, видів робіт, інструментів та інших параметрів, що формують опис складальних операцій. Найбільш трудомістким і складним для формалізації є творчий процес формування схеми складання та технологічного процесу складання, під час якого інженер визначає технологічні складальні одиниці та визначає можливий порядок складання. Дана робота, вважається першим етапом проектування технології складання.

При проектуванні технології складання використовується теорія графів, що дозволяє пов'язати теоретичні принципи з конкретними обчислювальними алгоритмами, які легко реалізуються на комп'ютері. Основоположником застосування математичної моделі як форми графа в інженерії є Б.С. Мордвінов [2], який ввів поняття взаємопов'язаної геометричної структури машини та її графіка. Сюди відноситься, зокрема, проблема послідовності складання виробів. J. Yu та L. Xu розробили підхід до автоматичної розробки послідовності складання на основі методу матриці зв'язків покомпонентно [3]. Р. Готтіполу та К. Гош запропонували підхід до створення виконуваної послідовності складання на основі аналізу обмежень контакту та мобільності [4]. К. Су розробив систематичний метод аналізу геометричних обмежень між складальними одиницями на основі інтерактивного моделювання САД-моделей [5]. Альфадлані Т., Самадхі М.А., Тоха І. [6] розробили автоматичний метод виявлення зіткнення між складальними одиницями. Цей метод заснований на геометричній інформації, отриманій шляхом спарювання складальних одиниць. Кантабабу М., Гірі Р. [7] запропонували підхід до генерації послідовності розбирання механічних моделей на основі матриці інтерференції та графа з'єднань. На основі матриці інтерференції М. Р. Бахубалендруні, Б.Б. Бісвал реалізували інтегровані методи, засновані на теорії, що використовується для вилучення критеріїв предикатів, таких як передача даних [8, 9], механічна здійсненність [10-12] і геометрична здійсненність [13] для створення оптимального ASP/DSP (проектування послідовності складання/демонтажу) [14].

**Метою роботи** є визначення послідовності з'єднання деталей при складанні виробів на основі матриць суміжності та частоти. В роботі розглядаються як об'єкт складання розглядаються вісесиметричні деталі. При побудові процесу складання слід мати на увазі, що процес складання – це процес формування зв'язків між деталями.

Тому спочатку необхідно ідентифікувати дані зв'язки, що можливо на основі використання математичної моделі виробу у вигляді графа, де частини є вершинами, а зв'язки – ребрами. Після визначення послідовності утворення зв'язків, яка ідентифікована в конструкції складальної одиниці, це вирішує задачу визначення послідовності складання виробу. Граф зв'язку між частинами вузла може бути представлений у вигляді матриці суміжності (графа), а послідовність, що утворює зв'язки, може бути представлена як матриця інцидентцій цього графа, в якій послідовність стовпців, іншими словами, ребра визначатиме послідовність складання. Тому задачею даного дослідження є розробка методології побудови та впорядкування матриці інцидентів графів



**Результати дослідження** Методологія побудови та впорядкування матриці інцидентності графа реалізується в такій послідовності:

- побудова геометричної моделі складальної одиниці (виробу);
- визначення контактів і силового замикання. Під контактом розуміють з'єднання деталей, що безпосередньо торкаються площинних або циліндричних поверхонь або дозволяють розташовувати третю частину між ними;
- ідентифікація для кожної частини зв'язку з іншими частинами з побудовою матриці суміжності;
- упорядкування деталей, складання моделі конструкції складальної одиниці (на основі матриці графіка суміжності);
- побудова графіку з ребрами-зв'язками та додаванням ребер силового замикання для моделі побудови складальної одиниці;
- визначення правил послідовності складання для ділянок, обмежених силовим замиканням;
- побудова початкової, неупорядкованої матриці інцидентності з матриці суміжності;
- упорядкування зв'язків у матриці випадків;
- реалізація процесу складання.

При реалізації процесу складання прийнято такі припущення. Під силовим замиканням розуміють з'єднання деталей, що отримане шляхом докладання до них зусиль для забезпечення безперервності контакту, збереження розташування деталі щодо іншої частини відповідно до конструкції складальної одиниці (різбові з'єднання, з'єднання за допомогою стопорного кільця, з'єднання під натягом тощо).

Також контакт буде вважатися ознакою зчеплення частин, розрив – властивістю силового замикання.

Розглянемо реалізацію методики на прикладі ротора насоса [16] (Рис. 1).

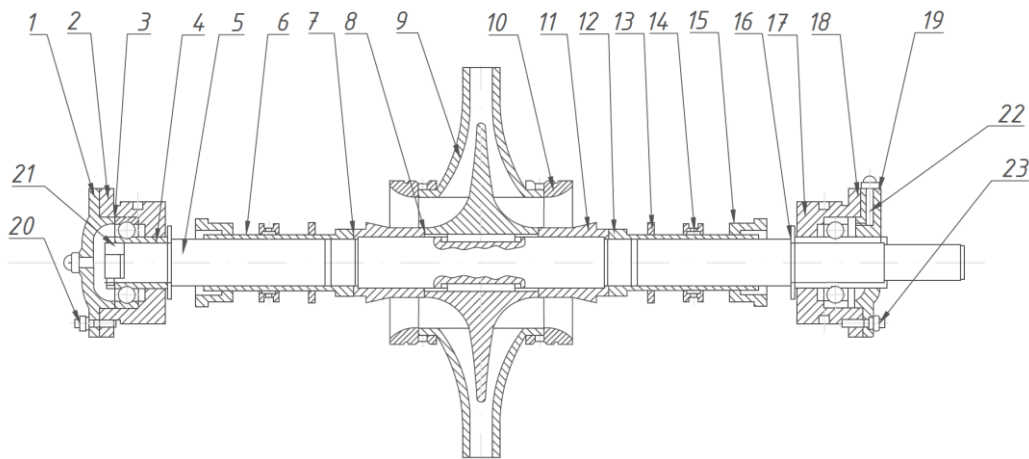


Рис. 1 – Ротор насоса: 1 - кришка підшипника, 2 - склянка підшипника п'яти, 3 – прокладка, 4 – втулка, 5 – вал, 6 - кільце сальника, 7,8 – прокладка, 9 - колесо робоче, 10 - кільце ущільнюоче, 11 - втулка напрямна, 12 - захисна втулка, 13 – сальниковий ущільнювач, 14 - кільце сальника, 15 - кришка сальника, 16 – відбійник, 17 - склянка підшипника, 18 – прокладка, 19 - кришка підшипника, 20 - болт, 21 – гайка, 22, 23 - болт

Для виконання моделювання конструкції вузла «Ротор насоса» необхідно перейти до моделі вузла у вигляді його геометричної моделі, в якій усі деталі мають лише площинні та циліндричні поверхні (Рис. 2).

При цьому трансформуємо форму деяких деталей, замінюючи конічні, сферичні, різьбові, фасонні поверхні на плоскі та циліндричні.

Математичне моделювання здійснюємо на основі спрощеної моделі у вигляді графіка, що враховує зв'язки тільки в одному – осьовому напрямку (між торцевими поверхнями деталей).

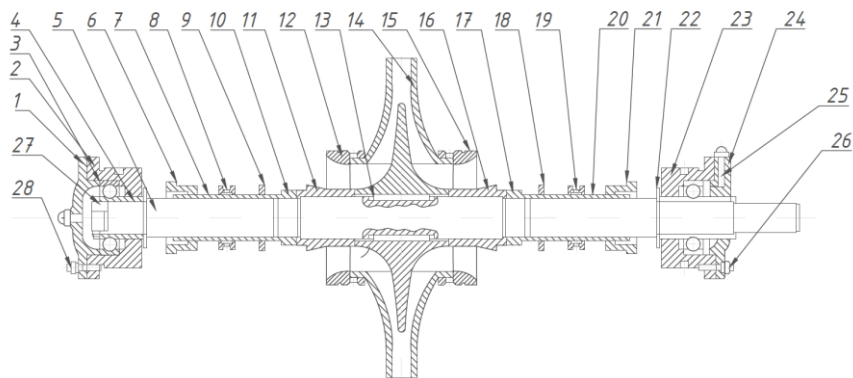


Рис. 2 – Геометрична модель конструкції вузла «Ротор насоса»

За вершини графа взято деталі, а за ребра графа – зв'язки між деталями. Під зв'язками розуміють безпосередній контакт між деталями, певна щілина або обмеження щодо взаємного розташування деталей у складальній одиниці.

В якості номера зв'язку вкажемо номери частин, з якими пов'язана ця частина (Рис. 3). Якщо є контакт між деталями, то визнається напрямок від розглянутої частини до сполучної – вправо або ліво, в залежності від того, розташована сполучна частина праворуч чи ліворуч, обмежуючи зміщення розглянутої деталі.

Тип зв'язку визначається рангом:

1 – безпосереднє з'єднання (контакт при складанні) – можна з'єднати без використання інших деталей – міцне з'єднання;

2 – з'єднання можливе тільки після попереднього складання інших деталей (є контакт) – слабе з'єднання;

3 – зв'язок вказує на взаємне розташування деталей у складальній одиниці без прямого контакту або заборону на неможливі положення.

Поруч із номером зв'язку вказується його ранг, що відокремлений від номера рангу точкою.

Надалі виконують ідентифікацію для кожної частини зв'язку 1-го і 2-го рангів з побудовою матриці суміжності. При цьому зв'язки 1-го і 2-го рангу є лише контактами – згідно з контактним графіком (там буде на одну менше, ніж кількість частин), тобто розпочати потрібно з визначення контактів, в результаті слід отримати дерево зв'язків (контакти) між частинами (Рис. 4).

Створення моделі складальної одиниці виконується на основі матриці суміжності.

При цьому процес упорядкування деталей полягає в побудові рядків і відповідних стовпців таким чином, що від'ємні числа розміщуються зверху головної діагоналі, додатні числа – знизу, а числа, рівні 1, ближче до головної діагоналі, завдяки вилученню чисел, дорівнює 2 від головної діагоналі.

В результаті цього отримуємо розташування деталей у моделі конструкції складальної одиниці (Табл. 1).

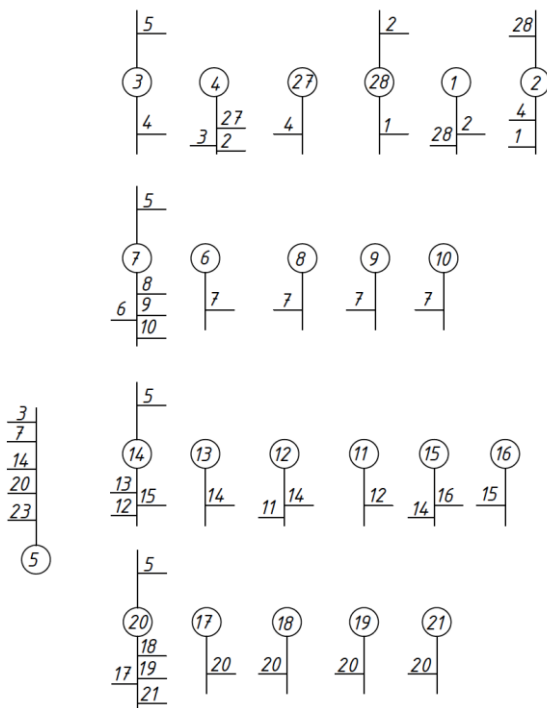


Рис. 3 – Позначення напрямків і ранг зв'язків між деталями в моделі конструкції складальної одиниці

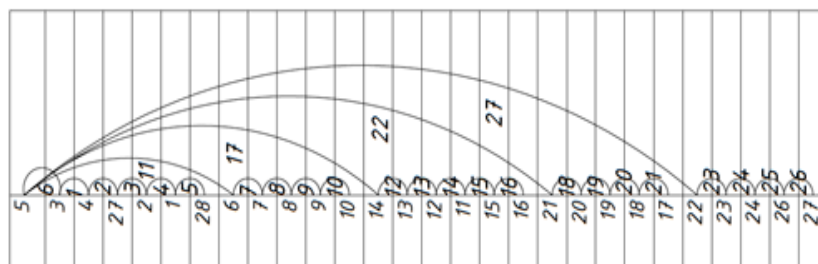
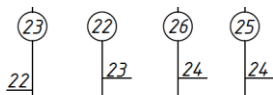


Рис. 4 – Послідовність складання за контактним графіком

Таблиця 1 – Матриця суміжності (результат упорядкування)

N	5	3	4	27	2	1	28	6	7	8	9	10	14	13	12	11	15	16	21	20	19	18	17	22	23	24	26	25
5	0	-1	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-2	0	0	0	0
3	1	0	-1	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	2	0	0	2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-1	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	-2	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	-1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	-1
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0

На рисунку 5 наказано побудований графік з ребрами-контактами та з додаванням ребер силового замикання. Тут також враховано силові контакти – різьбою (болти, гвинти) для замикання ланцюгів, стопорним кільцем.

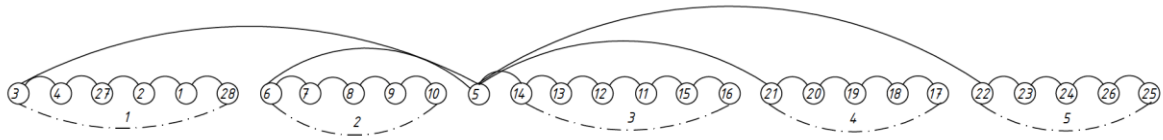


Рис. 5 – Граф-дерево зв'язків (контактів) і силового замикання між деталями (суцільні лінії – контакти, пунктир – силове замикання)

Надалі визначаються правила послідовності складання для ділянок, що обмежені силовим замиканням, та виконується побудова початкової, невпорядкованої матриці інцидентів.

При цьому кількість стовпців у матриці має бути на 1 менше кількості частин, а кількість зв'язків, визначених для всіх частин, більше, тому що для кожної частини можна вказати зв'язки з усіма іншими частинами, тобто  $n-1$  з'єднання, таким чином,  $(n-1) n/2$ . В матриці вказують всі можливі зв'язки.

Якщо дві частини з'єднані, їх зв'язки з іншими частинами поєднуються і зв'язки цих двох частин з'єднуються з однією частиною. Отже, кількість стовпців у матриці не повинна дорівнювати  $n-1$ , а дорівнювати кількості ідентифікованих зв'язків.

Зв'язки вносяться в матрицю випадків (табл. 2) у порядку, який фіксується в матриці суміжності. Враховуються лише типи зв'язків першого та другого рангу. Зв'язки третього рангу потрібні для побудови вузла, а не для визначення послідовності складання.

Таблиця 2 – Матриця суміжності (невпорядковані зв'язки)

N	5	3	4	27	2	1	28	6	7	8	9	10	14	13	12	11	15	16	21	20	19	18	17	22	23	24	26	25
5	1																											
3	1	1																										
4		2	1																									
27			2	1																								
2				2	1																							
1					2	1																						
28						1	1																					
6							2	1																				
7								2	1																			
8									2	1																		
9										2	1																	
10											2	1																
14												2	1															
13													2	1														
12														2	1													
11															2	1												
15																2	1											
16																	2	1										
21																		2	1									
20																			2	1								
19																				2	1							
18																					2	1						
17																						2	1					
22																							2	1				
23																								2	1			
24																									2	1		
26																										2	1	
25																											2	1

Після цього виконують упорядкування зв'язків у матриці випадків. Наступний зв'язок повинен перекривати попередній.

Правило приєднання частин має бути сформульовано виходячи з того, що буде використовуватися матриця частоти графіка, що означає впорядкування зв'язків між частинами та зв'язків у матриці випадків (табл. 3).

Таблиця 3 – Матриця суміжності (впорядковані зв'язки)

N																			
5				1 <sub>1</sub>			2			2			2						2
3	1 <sub>1</sub>			1 <sub>1</sub>															
4	1 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>																	
27		2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>																
2			2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>															
1				2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>														
28					2 <sub>1</sub>														
6					2 <sub>1</sub>			2											
7					2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>													
8						2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>												
9							2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>											
10								2 <sub>1</sub>											
14									2 <sub>1</sub>				2						
13									2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>									
12										2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>								
11											2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>							
15												2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>						
16													2 <sub>1</sub>						
21														2 <sub>1</sub>			2		
20														2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>				
19															2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>			
18																2 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>		
17																	1 <sub>1</sub>		
22																		2 <sub>1</sub>	2
23																		2 <sub>1</sub>	2 <sub>1</sub>
24																			2 <sub>1</sub>
26																			2 <sub>1</sub>
25																			1 <sub>1</sub>

На основі матриці суміжності реалізується процес складання. При цьому об'єднують зв'язані зв'язки і з кожним додаванням зменшується матриця на один рядок і один стовпець.

Виконана програмна реалізація наведеної методики моделювання процесу складання. В результаті комп'ютерного моделювання за цією програмою на екрані дисплея виводиться матриця зв'язків між деталями складальної одиниці. При правильно підготовлених даних матриця має бути косо-симетричною.

Для порівняння та аналізу відмінностей між теоретичним і комп'ютерним результатом моделювання конструкцій складальних одиниць і технологічним процесом складання маршрутизації проведено ряд чисельних експериментів.

У результаті чисельного експерименту на екран дисплея комп'ютера виводиться порядок розташування деталей у моделі конструкції складальної одиниці та послідовність з'єднання деталей (Рис. 6).



внести необхідні зміни в послідовність складання, на основі яких стає можливим контролювати дані та рішення при аналізі розмірів конструкцій і при проектуванні складальних процесів.

#### Список літератури

1. Якімов О.В., Марчук В.І., Дінчевський П.А., Якімов О.О., Ларшин В.П. Технологія машино- та приладобудування. Підручник. – Луцьк. Редакційно-аналітичний відділ ЛДТУ, 2005. – 712 с.
2. Мордвинов Б.С. Исследование геометрических структур с использованием методов теории графов. // Известия вузов. Машиностроение. No 3. 1965. С. 111–118
3. Yu J., Xu L. D., Bi Z. [et al.]. Extended interference matrices for exploded view of assembly planning. // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 279–286. DOI: 10.1109/TASE.2012.2235144
4. Gottipolu R. B., Ghosh K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences // Computers in Industry. 2003. Vol. 50. P. 251–264
5. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 48–57
6. Alfidhiani T., Samadhi A. M., Toha I. Automatic collision detection for assembly sequence planning using a three-dimensional solid model. // Journal of Advanced Manufacturing Systems. 2011. Vol. 10, Issue 02. P. 277–291. DOI: 10.1142/S021968671100220X
7. Giri R., Kanthababu M. Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 35, Issue 2. P. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249
9. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. A note on mechanical feasibility predicate for robotic assembly sequence generation // CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs & FoF. 2016. P. 397–404. DOI: 10.1007/978-81-322-2740-3\_38
10. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Liaison concatenation-A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product // Sadhana. 2016. Vol. 41, Issue 1. P. 67–74. DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8
11. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. A review on assembly sequence generation and its automation // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 230, Issue 5. P. 824–838
12. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // Assembly Automation. 2015. Vol. 35, Issue 4. P. 309–316
13. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. An intelligent approach towards optimal assembly sequence generation. // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 232, Issue 4. P. 531–541
14. Viganò R., Osorio Gómez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2013. Vol. 7, Issue 2. P. 79–89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9

#### References (transliterated)

1. Yakimov O.V., Marchuk V.I., Dinchevskiy P.A., Yakimov O.O. Larshyn V.P. Tekhnolohiia mashyno- ta prykladobuduvannia. Pidruchnyk. – Lutsk. Redaktsiino-analitychnyi viddil LDTU, 2005. – 712 s.
2. Mordevynov B.S. Yssledovanye heometrycheskykh struktur s yspolzovanyem metodov teoryy hrafov. // Yzvestyia vuzov. Mashynostroenye. No 3. 1965. S. 111–118
3. Yu J., Xu L. D., Bi Z. [et al.]. Extended interference matrices for exploded view of assembly planning. // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 279–286. DOI: 10.1109/TASE.2012.2235144
4. Gottipolu R. B., Ghosh K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences // Computers in Industry. 2003. Vol. 50. P. 251–264
5. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 48–57
6. Alfidhiani T., Samadhi A. M., Toha I. Automatic collision detection for assembly sequence planning using a three-dimensional solid model. // Journal of Advanced Manufacturing Systems. 2011. Vol. 10, Issue 02. P. 277–291. DOI: 10.1142/S021968671100220X
7. Giri R., Kanthababu M. Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 35, Issue 2. P. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249
9. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. A note on mechanical feasibility predicate for robotic assembly sequence generation // CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs & FoF. 2016. P. 397–404. DOI: 10.1007/978-81-322-2740-3\_38
10. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Liaison concatenation-A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product // Sadhana. 2016. Vol. 41, Issue 1. P. 67–74. DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8
11. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. A review on assembly sequence generation and its automation // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 230, Issue 5. P. 824–838
12. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // Assembly Automation. 2015. Vol. 35, Issue 4. P. 309–316
13. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. An intelligent approach towards optimal assembly sequence generation. // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 232, Issue 4. P. 531–541
14. Viganò R., Osorio Gómez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2013. Vol. 7, Issue 2. P. 79–89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9

Поступила (received) 03.04.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Юрковець Василь Ігоревич (Yurkovets Vasyl Igorevych)** – аспірант кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8434-5801>; e-mail: [yurkovec.v@gmail.com](mailto:yurkovec.v@gmail.com)

**Вислоух Сергій Петрович (Vysloukh Sergiy Petrovych)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2204-2602>; e-mail: [vsp1@ukr.net](mailto:vsp1@ukr.net)

**Антонюк Віктор Степанович (Antonyuk Viktor Stepanovych)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри, професор кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0690-2411>; e-mail: [victor.antoniuk@gmail.com](mailto:victor.antoniuk@gmail.com)



**ДОБРОТВОРСЬКИЙ С.С., БАСОВА Є.В., ХАРЧЕНКО О.С., ЛЕТЮК В.І., ЯКОВЕНКО І.Є.,  
КОТЛЯР О.В., АБУ САМРА Ю.**

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМИ ТА ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ ЛОПАТОК ТУРБІНИ НА ЦИФРОВИХ МОДЕЛЯХ**

Розроблено цифрову твердотільну модель лопатки турбіни з монтажною полкою у SolidWorks. Опис складних поверхонь виконано за допомогою сплайн функцій. Методом комп'ютерного моделювання за допомогою програми SolidWorks Simulation досліджено розподіл власних коливань лопатки в залежності від способу її закріплення при механічній обробці. Отримано та проаналізовано спектри власних коливань лопатки у звуковому діапазоні. Проаналізована також форма власних коливань складних поверхонь. Показано, що для правильного вибору параметрів оброблення при механічній обробці необхідно враховувати як умови закріплення деталі у пристосуванні, так і частоту власних коливань деталі. Зазначено, що не менш важливим параметром виявляється також форма коливань тонкої поверхні на досліджуваних частотах. Зазначено, що у майбутньому вирішити ці проблеми можливо за рахунок комп'ютерного моделювання.

**Ключові слова:** механічна обробка, власні коливання, комп'ютерне моделювання, лопатковий апарат, технологічна спадковість.

### **DOBROTVORSKIY S., BASOVA Ye., KHARCHENKO O., LETIUK V., YAKOVENKO I., KOTLIAR A., ABOU SAMRA Y. DETERMINATION OF THE FEATURES OF THE SHAPE AND VIBRATION FREQUENCY OF TURBINE BLADES ON DIGITAL MODELS**

A digital solid model of a turbine blade with a mounting shelf has been developed in SolidWorks. The description of complex surfaces is made using spline functions. The method of computer simulation using SolidWorks Simulation was used to study the distribution of natural oscillations of the blade depending on the method of its fixing during machining. The spectra of natural oscillations of the blade in the sound range have been obtained and analyzed. The form of natural vibrations of complex surfaces is also analyzed. For the correct choice of processing parameters during machining, it is necessary to take into account both the conditions for fixing the part in the fixture and the natural frequency of the part. It is noted that an equally important parameter is the form of oscillations of a thin surface at the studied frequencies. It is noted that in the future it is possible to solve these problems through computer simulation.

**Keywords:** mechanical processing, natural oscillations, computer modeling, blades, technological heredity

**Вступ.** Одним з найбільш напружених вузлів турбіни, що значною мірою визначають економічність, надійність та загальну конструктивну схему всього турбоагрегату, є лопатковий апарат. Конструкція лопатки істотно залежить від рівня наукового забезпечення проектування в питаннях аеродинаміки потоку, статичної та динамічної міцності, можливостей металургійної бази, матеріалів і існуючих технологій обробки. Вибір конструктивної форми, розмірів і матеріалу залежить від умов, в яких їм доводиться працювати, і в значній мірі визначає надійність і економічність експлуатації турбін [1]. До того ж лопатковий апарат є найдорожчою та найтрудомінішою частиною турбіни. А економічність такого виробу напряму залежить від якості та точності виготовлення лопаткового апарату, тобто і від методів їх проектування та подальшого механічного оброблення.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Конденсаційні турбіни призначені для перетворення на механічну роботу максимальної частини теплоти пари. У таких турбінах відпрацьована пара випускається в конденсатор, в якому підтримується вакуум (рис.1).

Граничною потужністю конденсаційної турбіни називають максимально можливу потужність при заданому числі обертів. Гранична потужність визначається пропускною здатністю останнього ступеня турбіни, пропускати максимальний об'єм пари: ця потужність тим вища, чим довші лопатки цього ступеня і чим більший діаметр їх посадки. Але збільшення довжини лопатки посилює її коливання та зношування під впливом пари. Тому при проектуванні лопатки важливо моделювати ці процеси, щоб оцінити можливі напружень та рівень вібрацій на заданих режимах роботи.

Особливу перевагу в експлуатації мають довгі лопатки без зв'язків: на стадії проектування можна забезпечити надійність, відбудувавши лопатку від резонансних частот із достатнім запасом. Одна з умов оптимальної відбудови – перша власна частота повинна перевищувати обурюючу частоту другої кратності:

$$f_{\delta 1} > 2n_p. \quad (1)$$

Така умова може бути забезпечена відповідним вибором розміру хорд профілів лопатки, оскільки це особливо впливає на жорсткість (а отже, і на частоти).

Недоліками лопаток без зв'язків є слабе демпфування та автоколивання. Більшу вібраційну надійність мають лопатки з демпфуючими зв'язками (бандажними та дротяними), проте через ускладнену конструкцію спектр власних частот, природно, виходить більш щільним, що ускладнює попередній розрахунок коливань – отже, таку лопатку складніше відбудувати від резонансів.

Лопатка турбіни - це окремий компонент, який утворює турбінну секцію парової турбіни [2]. Лопатка відповідає за отримання енергії з високотемпературної пари високого тиску, що виробляється камерою згоряння (котлом). Щоб вижити в цьому складному середовищі, лопатки турбін часто використовують екзотичні матеріали, такі як нікель, хром, титан [3].

Матеріал, який використовується для лопаток турбіни, залежить від рівня роботи турбіни, що відповідає трьом ступеням: високого тиску, середнього тиску і низького тиску [4].



Лопатки високого і середнього тиску зазвичай виготовляються з нержавіючої сталі, оскільки нержавіюча сталь має кращі властивості при високих температурах. Точний вибір матеріалів для застосування у лопатках низького тиску залежить від міцності та корозії, титанові сплави, особливо Ti-6Al-4V, використовуються в турбінах низького тиску з 1960 року. Ці сплави особливо підходять для лопаток низького тиску. Оскільки щільність титанового сплаву становить менше, ніж щільність сталі, і цей сплав меншої щільності може подовжити термін служби лопаток низького тиску та підвищити ефективність турбіни без збільшення стресу [5]. По-друге, титановий сплав має міцнішу стійкість до корозії, ніж сталь, а вологість класу низького тиску вища, тому титановий сплав є більш придатним. Нарешті, титанові сплави достатньо водостійкі для використання без корозії. Загалом вибір матеріалу визначає успішність чи невдачу леза, міцність на розрив, стійкість до тиску, корозії опір і пружність, що визначають навантаження при роботі леза [6].

Щоб зробити обертову лопатку більш надійною, для вирішення проблеми в техніці часто використовують метод додавання бандажів до лопатки (рис.2). Бандаж може збільшити жорсткість і власну частоту леза, і коли лезо вібрує, робоча поверхня бандажу може тертися одна об одну, щоб поглинати енергію вібрації [7].

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Незважаючи на те, що інші конструкції мають важливе застосування, найбільш часто використовуваною конструкцією бандажу в експлуатації сьогодні все ще є заклепковий бандаж, де окрема стрічка матеріалу прикріплена до кінчиків кожного леза аеродинамічного профілю одним або декількома шипами. Це поширений тип бандажу, виготовленого з ряду сегментів бандажу, кожен охоплюють кілька лез. Бандажі зазвичай встановлюються для створення окремих пакетів лопастей, які зв'язані разом кожухом. Довжина і кількість пакетів вибирає конструктор для модифікації вібраційної поведінки лопатевого диска та уникнення потенційно небезпечних специфічних форм і частот вібрації для лопатевої збірки диска.



Рис. 1 – Ілюстрація застосування заклепкового бандажу

На відміну від клепанних кожухів, які є окремими деталями, скріпленими за допомогою заклепок шипів після збору лопаток в диск турбіни, цільні кожухи виготовляються як складові частини окремих лопастей (рис.2). Таким чином повна плащаниця формується з сегментів плащаниці які прикріплені до кожного кінчика леза.

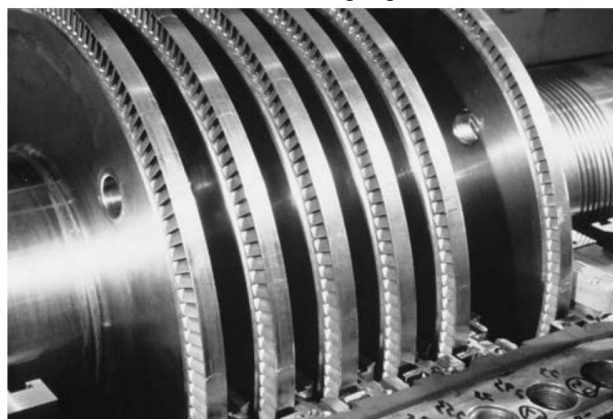


Рис. 2 – Застосування цільних кожухів

Особливою версією інтегрального кожуха є кожух Z-lock (рис.3), що складається блокуючих сегментів кожуха, які навантажуються один на одного в експлуатації, щоб забезпечити контакт на опорних поверхнях. Z-замки майже завжди використовуються на скручених ділянках профілю тому що вони внутрішньо активуються закручуванням профілю що відбувається зі збільшенням швидкості [8].

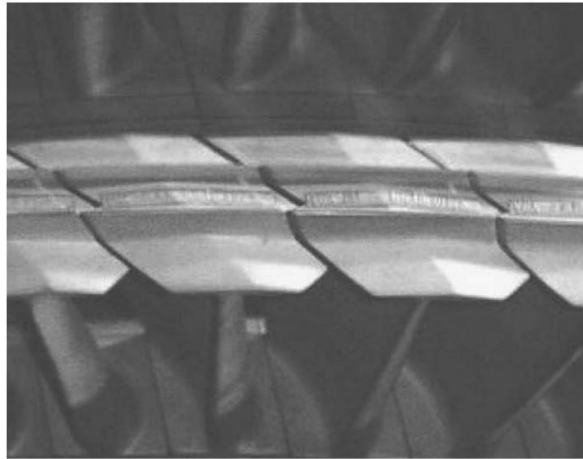


Рис. 3 – Ілюстрація застосування кожуха Z-lock

Кожна конструкція має тенденцію вібрувати на певних частотах, які називаються власними або резонансними частотами. Кожна частота власних коливань асоціюється з певною формою, яка називається формою коливань, яку модель прагне приймати при вібруванні на цій частоті. При дії на тіло або конструкцію періодично змінної збуджуючої сили виникають вимушені коливання. Коли співпадають частоти і напрямки власних коливань із частотами і напрямками вимушених коливань виникає резонанс. Явище резонансу небезпечне для конструкції або споруди, оскільки зростає амплітуда коливань, що в свою чергу призводить до збільшення деформації і напруженості в середовищі, в якому відбуваються коливання. Це може призвести до поломки або руйнування обладнання, споруд, що може бути причиною травматизму, нещасних випадків. В експлуатації лопатки турбін працюють у широкому інтервалі частот динамічних навантажень. Такі навантаження з часом можуть призводити до втомних деформацій, мікротріщин, що змінює динамічні характеристики конструкції лопаток. Лопатка є пружною конструкцією та має спектр власних частот та форм коливань. Вони впливають на динамічні властивості самої лопатки та її здатність реагувати на різні дії [9]. Аналіз власної частоти та форми коливань лопатки турбомашини дає змогу прогнозування динамічного відгуку лопаток під навантаженням, що є актуальним завданням, так як дозволяє охарактеризувати залежність власних частот коливань від режиму роботи та гарантовано уникнути резонансу для проєктованих лопаток.

Метою даної роботи є розробка шляхів удосконалення технології виготовлення деталей типу лопатки турбомашини на етапі її проєктування.

**Матеріали дослідження.** Для чисельних експериментів була спроектована модель лопатки турбомашини з бондажною полкою в середовищі SolidWorks. Аналіз частот та деформацій лопатки виконували у додатку SolidWorks Simulation. Для проведення дослідження власних коливань необхідно встановити яким чином буде закріплена заготовка під час дослідження.

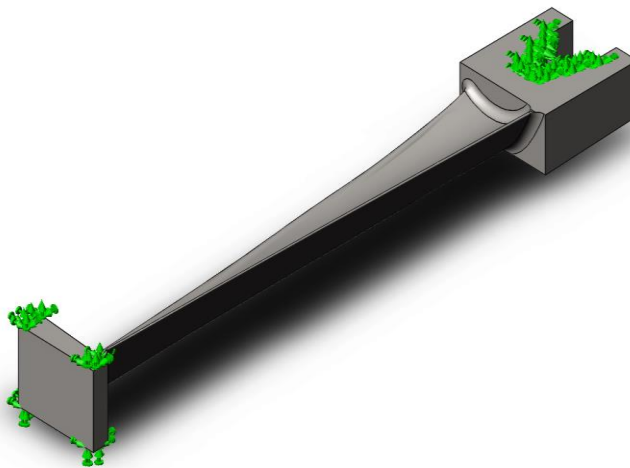


Рис. 4 – Твердотільна модель лопатки із накладеними обмеженнями

Після встановлення закріплення вносяться данні дослідження, до яких відносяться система одиниць фізичних величин, верхня границя частот, температура навколишнього середовища та властивості використаної сталі. На основі цих даних можливо отримати розподіл частоти власних коливань лопатки, розподіл ефективної маси, та розподіл кумулятивної маси.

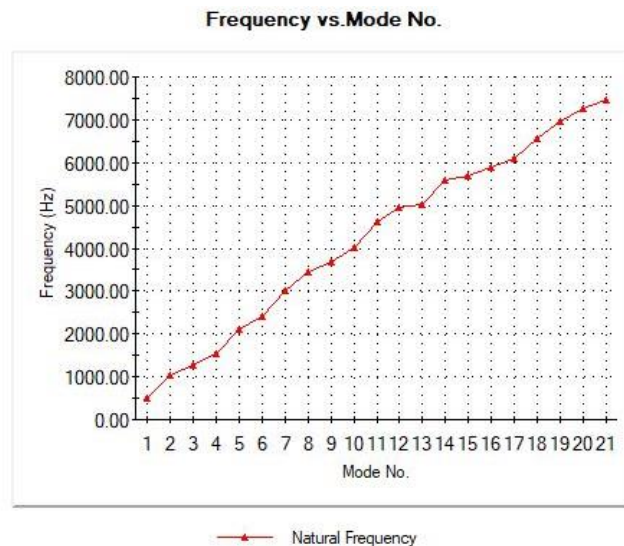


Рис. 5 – Залежність величини коливаль лопатки від моди

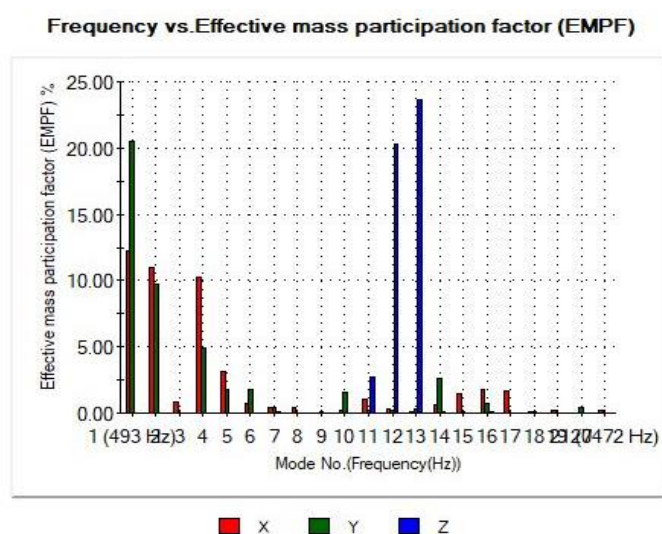


Рис. 6 – Розподіл частот вільних коливань лопатки пластини лопатки

На першому етапі, дотримуючись вимог технології виготовлення лопатки, були проведені чисельні комп'ютерні експерименти щодо визначення власних частот коливань лопатки в робочому стані (відповідно до закріплення, представленого на рис.4). Дослідження проводилися в діапазоні власних частот коливань лопатки до 21 мод. Дослідження показало, що переважна більшість вільних коливань посідає область до 15 мод.

На рис. 6 показано частотне розподілення вільних коливань лопатки. На рис. 7 показано розподіл повної ефективної маси, що характеризує амплітуду коливань. Результати розрахунків показують, що найбільша амплітуда коливань осі Y з накопиченою масою припадає на область критичних частот 493,95 Гц (0,205 мм), 1032.1 Гц (0,09 мм), по осі X на частотах 493,95 Гц (0.122 мм) 1032.1 Гц (0.109 мм), 1529.8 Гц (0.102 мм) по осі Z - 4939.6 Гц (0,202 мм), 5005.6 Гц (0,236 мм). В роботі [10] авторами визначено, що власні частоти коливань лопаток можуть зміщуватися в залежності від умов закріплення деталі в пристосуваннях, що безумовно необхідно враховувати при розробці технологічного процесу обробки профілю лопатки.

### Frequency vs. Cumulative effective mass participation factor (CEMPF)

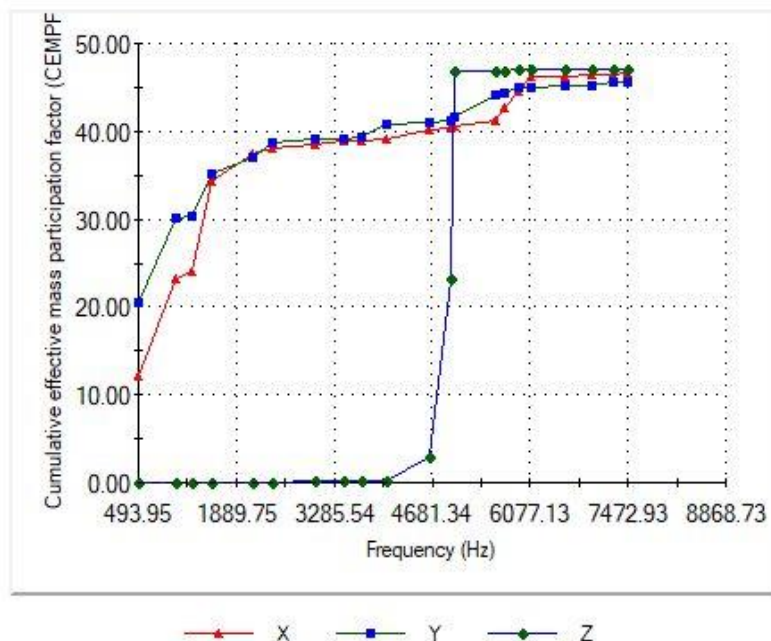


Рис. 7 – Розподіл сумарної ефективної маси лопасті лопатки

Отримані частоти та розподіл мас по осях представлений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати комп'ютерного експерименту із аналізу частот власних коливань та розподілу комюлятивної маси

Mode Number	Frequency(Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	<b>493.95</b>	<b>0.12231</b>	<b>0.20512</b>	<b>6.549e-07</b>
2	1032.1	0.10964	0.097132	0.00016123
3	1268.4	0.0080227	0.00010519	2.5503e-06
4	1529.8	0.1029	0.049234	8.3652e-05
5	2116.7	0.030897	0.018058	4.1095e-05
6	2415.6	0.0072034	0.017418	1.9114e-07
7	3007.2	0.0036659	0.0042825	0.0014065
8	3432.1	0.0044527	0.00039942	0.00031463
9	3683.5	2.5095e-05	0.00077095	9.7453e-06
10	4025.8	0.0022531	0.015802	0.00019283
11	4632.6	0.010221	0.0021487	0.027128
12	4939.6	0.003087	0.0024719	0.20241
13	5005.6	0.0013745	0.0030269	0.23591
14	5585.6	0.0063178	0.025913	0.0015237
<b>15</b>	<b>5706.5</b>	<b>0.014911</b>	<b>0.00084327</b>	<b>9.6802e-05</b>
16	5903.6	0.017701	0.0076774	0.00073956
17	6102.8	0.016572	0.00021775	2.7218e-06
18	6575.4	0.00085106	0.00063623	0.00010633
19	6965.3	0.0016347	3.679e-05	3.2786e-06
20	7270.6	0.00019976	0.0041529	6.1211e-05
21	7472.9	0.0024354	7.6201e-07	9.0861e-05
		Sum X = 0.46668	Sum Y = 0.45544	Sum Z = 0.47029

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що при механічній обробці необхідно вести індивідуальний аналіз частоти і форми власних коливань. Врахування тільки частоти коливань є недостатнім. Так небезпечними модами можуть бути як перша мода коливань, так і п'ятнадцята (рис. 8).

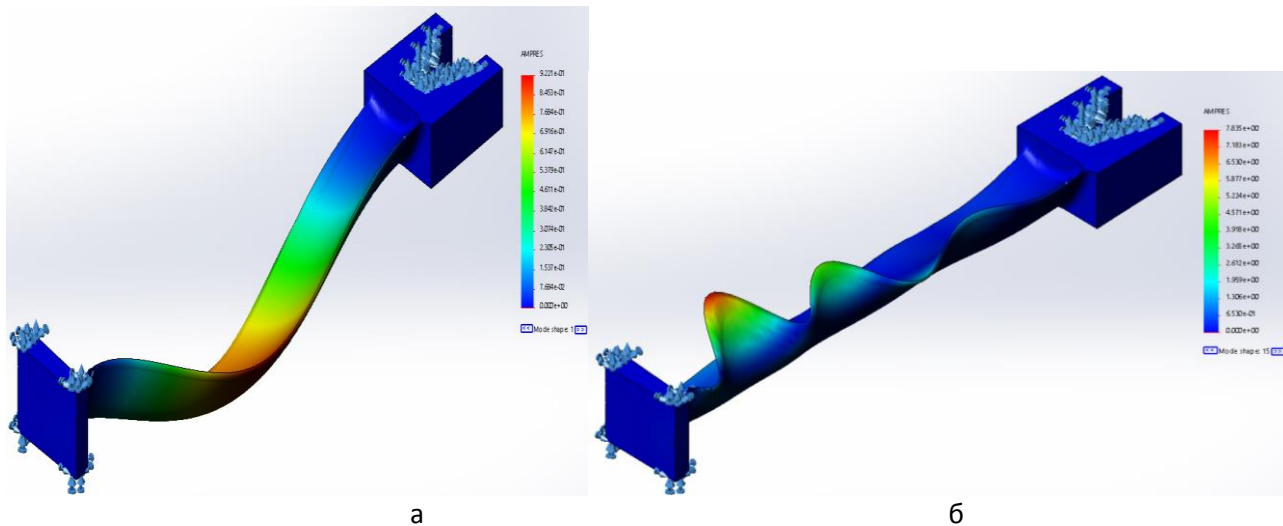


Рис. 8 – Компьютерне моделювання власних коливань лопатки при механічному обробленні:  
а – 1 мода, б – 15 мода

**Висновки.** В роботі було отримано власні частоти коливань турбінної лопатки. Чисельно проаналізовано спектр частот, форми коливань, отримано розподіл ефективної та кумулятивної маси. Отримані результати дають нам змогу прогнозувати при яких частотах можливе виникнення резонансу при механічному обробленні лопатки, та його вплив на лопатку. Серед подальших досліджень планується визначення формування особливостей впливу власних коливань лопатки в процесі виготовлення на технологічну спадковість.

**Підтвердження.** Загальний підхід розроблено в рамках науково-дослідного проекту «Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи» (№ 0121U107511).

#### Список літератури:

14. Шубенко А. Л. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты / А. Л. Шубенко, А. Э. Ковальский // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2012. – № 7. – С. 76-87.
15. Новиков В. А. Технология производства и монтажа паровых и газовых турбин : учебное наглядное пособие : Рекомендовано методическим советом Уральского федерального университета для студентов вуза, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.03, 13.04.03 — Энергетическое машиностроение / В. А. Новиков ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020. — 296 с. — ISBN 978-5-7996-3153-6.
16. Торьянников, А.Ю., Барышников А.А. Микроструктура и свойства титановых сплавов - Молодой ученый, 2021. - № 49 (391). - С. 47-51.
17. Liu Z., Chen Z. and Chen J. The Strength Analysis of CFM56 Engine Blade. MATEC Web of Conferences (ICMAA), vol. 166, 2018. DOI:10.1051/mateconf/201816604001
18. Tianshu L., Lin W. Research on bearing capacity of loess roots in low-pressure stage based on elastoplastic theory[j]. Thermal Turbine, 2014 – vol. 43(1) – pp. 56 - 58.
19. Xiongzen L., Luping L., Shihai Z., et al. Modeling and Modal Analysis of Turbine Rotor Blades [j]. Turbine Technology Surgery, 2015 – vol. 57(5) – pp. 329 – 332.
20. Kaneko Y., Mori K., and Ohyama H.. Development and verification of 3000 rpm 48-inch integral shroud blade for steam turbine. in Proceedings of the ASME 2005 Power Conference, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Chicago, IL, USA, April 2005. - pp. 609–616
21. The McGraw-Hill Companies, Inc. Blade Design and Analysis for Steam Turbines, 1st Edition, 2011.
22. Нгуен Нгок Т., Капралов В.М.. Анализ резонанса и свободных колебаний лопатки газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. №2. С. 149-160. DOI: 10.18721/JEST.25212.
23. Dobrovorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Mounif, A.S.Y. A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 220-231. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_22)



### Bibliography (transliterated):

1. Shubenko A. L. Kapleudarnaia eroziya lopatochnykh apparatov parovykh turbyn. Prohnozyrovanye y metody zashchyty / A. L. Shubenko, A. Э. Kovalskiy // Vestnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPY" : sb. nauch. tr. Temat. vyr. : Enerheticheskiye y teplotekhnicheskiye protsessy y oborudovanye. – Kharkov : NTU "KhPY". – 2012. – № 7. – S. 76-87.
2. Novykov V. A. Tekhnolohiya proizvodstva y montazha parovykh y hazovykh turbyn : uchebnoe nahliadnoe posobyе : Rekomendovano metodicheskyim sovetom Uralskoho federalnogo unyversyteta dlia studentov vuza, obuchaiushchykhsia po napravleniyam podgotovky 13.03.03, 13.04.03 — Enerheticheskoe mashynostroeniye / V. A. Novykov ; Mynysterstvo nauky y vyssheho obrazovaniya Rossyiskoi Federatsyy, Uralskiy federalnyi unyversytet ymeny pervogo Prezydenta Rossyy B. N. Eltsyna. — Ekaterynburh : Yzdatelstvo Uralskoho unyversyteta, 2020. — 296 s. — ISBN 978-5-7996-3153-6.
3. Toriannykov, A.Yu., Varyshnykov A.A. Mykrostruktura y svoistva tytanovykh splavov - Molodoi uchenyi, 2021. - № 49 (391). - S. 47-51.
4. Liu Z., Chen Z. and Chen J. The Strength Analysis of CFM56 Engine Blade. MATEC Web of Conferences (ICMAA), vol. 166, 2018. DOI:10.1051/mateconf/201816604001
5. Tianshu L., Lin W. Research on bearing capacity of loess roots in low-pressure stage based on elastoplastic theory[j]. Thermal Turbine, 2014 – vol. 43(1) – pp. 56 - 58.
6. Xiongzen L., Luping L., Shihai Z., et al. Modeling and Modal Analysis of Turbine Rotor Blades [j]. Turbine Technology Surgery, 2015 – vol. 57(5) – pp. 329 – 332.
7. Kaneko Y., Mori K., and Ohyama H.. Development and verification of 3000 rpm 48-inch integral shroud blade for steam turbine. in Proceedings of the ASME 2005 Power Conference, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Chicago, IL, USA, April 2005. - pp. 609–616
8. The McGraw-Hill Companies, Inc. Blade Design and Analysis for Steam Turbines, 1st Edition, 2011.
9. Nhuen Nhok T., Kapralov V.M.. Analiz rezonansa y svobodnykh kolebaniy lopatky hazovoi turbiny // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye y ynzhenernyye nauky. 2019. - T. 25. №2.- S. 149-160. DOI: 10.18721/JEST.25212.
10. Dobrovorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovol'ska, L., Mounif, A.S.Y. A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 220-231. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_22)

Поступила (received) 27.03.2022

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Доброворський Сергій Семенович (Dobrovorskiy Sergey)** – 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; e-mail: [sdobro50@gmail.com](mailto:sdobro50@gmail.com), ORCID: 0000-0003-1223-1036

**Басова Євгенія Володимирівна (Basova Yevheniia)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [e.v.basova.khpi@gmail.com](mailto:e.v.basova.khpi@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8549-4788

**Харченко Олександр Сергійович (Kharchenko Oleksandr)** – магістрант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0002-7415-6169

**Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii)** – аспірант кафедри «Інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф. Семка» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», заступник начальника цеху в АТ "Українські енергетичні машини", м. Харків, e-mail: [spirit.nrg.13@gmail.com](mailto:spirit.nrg.13@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9600-2371

**Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor)** - кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [igor.dych59@gmail.com](mailto:igor.dych59@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8344-996X

**Котляр Олексій Віталійович (Kotliar Alexey)** - кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [Alexeykotliar@gmail.com](mailto:Alexeykotliar@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7664-0395

**Абу Самра Юсеф (Abou Samra Youssef Mounif)** - аспірант кафедри Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [josehpcospl@gmail.com](mailto:josehpcospl@gmail.com)

## ЗМІСТ

<i>Мановицький О.С., Клименко С.А., Манохін А.С.</i> Порівняння зносу фрез з пнтм при обробці абразивного полімерного компаунду.....	3
<i>Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Клочко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В.</i> Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укд200-500 нового покоління.....	7
<i>Майборода В.С., Джулій Д.Ю., Бесарабець Ю.Й., Слободянюк І.В., Заставський К.О.</i> Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно–абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванн. 16	
<i>Клочко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Охрименко О.А., Манохін М.С., Пермяков Є.О.</i> Вплив мастила на технічний рівень високошвидкісних передач з асиметричним профілем.....	23.
<i>Шелковий О.М., Гасанов М.І., Заковоротній О.Ю., Главчева Ю.М., Летюк В.І., Феденюк Д.В.</i> Модель формування допоміжних машинноручних технологічних операцій.....	31
<i>Клименко Г.П., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Щербакова А.Ю.</i> Оптимізація режимів різання на важких верстатах .....	43
<i>Степанов М.С., Лтвоченко П.І., Іванова Л.П., Іванова М.С.</i> Дослідження впливу температури робочої рідини в підшипниках шпинделя круглошліфувального верстату на похибку його положення відносно оброблюваної деталі 49	
<i>Ковальов В.Д., Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Коваленко А.В.</i> Система адаптивного керування тиском у кишнях гідростатичних опор шпиндельного вузла і зусиллям натягу привода позиціонування шпинделя важкого токарного верстата .....	56
<i>Новіков Ф. В., Полянський В. І.</i> Технологічні закономірності підвищення точності та продуктивності механічної обробки .....	64
<i>Севидова О.К., Шелковой О.М., Руднев О.В., Гуцаленко Ю.Г.</i> Експериментальні дослідження температури алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів з твердим змащуванням .....	72
<i>Тарельник В.Б., Пирогов В.О.</i> Підвищення довговічності валів відцентрових насосів комбінованими методами.....	79
<i>Стрельчук Р. М., Шелковий О.М.</i> Моделювання міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі зміною полярністю електродів.....	88
<i>Новіков Ф.В., Полянський В.І.</i> Розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення .....	96
<i>Тимофєєва Л.А., Волошина Л.В., Тимофєєв С.С., Волошин Д.І., Колесник М.А.</i> Модифікація поверхні деталей машин і механізмів в умовах тертя та зношування .....	104
<i>Юрковець В.І, Вислоух С.П., Антонюк В.С.</i> Моделювання послідовності складання вісесиметричних деталей.....	110
<i>Добротворський С.С., Басова Є.В., Харченко О.С., Летюк В.І., Яковенко І.Е., Котляр О.В., Абу Самра Ю.</i> Визначення особливостей форми та частоти коливань лопаток турбіни на цифрових моделях .....	117



## CONTENTS

<i>Manovytskyi O.S., Klymenko S.A., Manokhin A.S.</i> Comparison of the wear of milling cutters with pntm when processing an abrasive polymer compound.....	3
<i>Nezhebovskiy V.V., Bereznyi R.A., Permyakov O.A., Klochko O.O., Ryabchenko S.V., Ustinenko O.V.</i> Systems of parameters of the condition of the working surfaces and the accuracy of dimensions of cylindrical hardened gears of the cleaning combine ukd200-500 of the new generation.....	7
<i>Maiboroda V.S., Juliy D.Yu., Besarabets Y.Y., Slobodyaniuk I.V., Zastavskiy K.O.</i> Research of frontal resistance forces arising in a magnetic-abrasive tool during processing of cylindrical parts in an annular bath.....	16
<i>Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Okhrimenko O.A., Manokhin M.S., Permyakov E.O.</i> The influence of lubricant on the technical level of high-speed gears with an asymmetric profile.....	23
<i>Shelkovy O.M., Hasanov M.I., Zakovorotniy O.Yu., Glavcheva Y.M., Letyuk V.I., Fedeniuk D.V.</i> The model of the formation of auxiliary machine-manual technological operations.....	31
<i>Klymenko G.P., Kovalev V.D., Vasylichenko Y.V., Shapovalov M.V., Shcherbakova A.Yu.</i> Optimization of cutting modes on heavy machines .....	43
<i>Stepanov M.S., Litovchenko P.I., Ivanova L.P., Ivanova M.S.</i> Study of the influence of the temperature of the working fluid in the bearings of the spindle of a circular grinding machine on the error of its position relative to the processed part.....	49
<i>Kovalov V.D., Klymenko G.P., Vasylichenko Ya.V., Shapovalov M.V., Kovalenko A.V.</i> The system of adaptive control of the pressure in the pockets of the hydrostatic supports of the spindle unit and the tension force of the spindle positioning drive of the heavy lathe .....	56
<i>Novikov F.V., Polyanskyi V.I.</i> Technological regularities of increasing the accuracy and productivity of mechanical processing.....	64
<i>Sevydova O.K., Shelkovoy O.M., Rudnev O.V., Gutsalenko Yu.G.</i> Experimental studies of the temperature of diamond grinding of hard-to-machine materials with solid lubrication .....	72
<i>Tarel'nyk V.B., Pirogov V.O.</i> Increasing the durability of shafts of centrifugal pumps by combined methods.....	79
<i>Strelchuk R. M., Shelkovy O. M.</i> Modeling of the interelectrode gap during electroerosion grinding with a change in electrode polarity.....	88
<i>Novikov F.V., Polyanskyi V.I.</i> Development of a theoretical approach to determining the cutting temperature during grinding and the conditions for its reduction .....	96
<i>Timofeeva L.A., Voloshina L.V., Timofeev S.S., Voloshyn D.I., Kolesnyk M.A.</i> Modification of the surface of parts of machines and mechanisms under conditions of friction and wear .....	104
<i>Yurkovets V.I., Vysloukh S.P., Antonyuk V.S.</i> Modeling the assembly sequence of axisymmetric parts.....	110
<i>Dobrotvorskyi S.S., Basova E.V., Kharchenko O.S., Letyuk V.I., Yakovenko I.E., Kotlyar O.V., Abu Samra Yu.</i> Determination of features of the shape and frequency of oscillations of turbine blades on digital models .....	117

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В**

*Збірник наукових праць*

**№ 2'(6) 2022**

Наукові редактори:	О.О. Пермяков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна О.О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор:	О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, 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@khpj.edu.ua](mailto:oleksandr.klochko@khpj.edu.ua), [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net)

Підп. до друку 07.05.2022 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. № 23.  
Ціна договірна.

---

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №  
24800000000079553, від 16.05.2007 р.