

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ**

**MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE**

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

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

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

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

**№ 1(13)'2026**

**№. 1(13)'2026**

**Збірник наукових праць**

**Collection of Scientific papers**

**Видання засноване у 1961 р.**

**The edition was founded in 1961**

**Харків  
НТУ «ХПІ», 2026**

**Kharkiv  
NTU "KhPI", 2026**

**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», 2026– № 1(13). –106 с.–ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).**

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.

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

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України КВ № 24359-14199Р від 10 лютого 2020 р.

Мова статей – українська, англійська.

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні** включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», категорія «Б» (наказ МОН України № 320 від 07.04.2022 р.). **Періодичність 2 рази на рік. УДК 620-УДК 629**

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:** <https://web.kpi.kharkov.ua/tmms/uk/visnik-ntu-hpi/>

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

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

**Видавник** кафедра технологій машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ»

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

**Редакційна колегія**

**Editorial board**

**Головний редактор:**

**Editor in Chief:**

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

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

**Заступник головного редактора:**

**Deputy editor:**

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

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

**Відповідальний секретар:**

**Responsible secretary:**

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

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

**Члени редколегії:**

**Members of the editorial board:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Драган Пераковић PhD*, професор, Университет

*Dragan Perakovich PhD*, professor, University, Zagreb, Croatia

Загреб, Хорватія

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

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

*Klymenko S.A.*, Dr. Tech. Corresponding Member of Sciences Academy of Sciences of Ukraine

*Клименко С.А.*, д-р техн. наук член-коресп. АН України

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

*Kovalev V.D.*, Dr. Tech. Sciences, Prof., DDMA, Ukraine

*Купріянов О.В.*, д-р техн. наук, проф., УІПА, Україна

*Kupriyanov O.V.*, Dr. Tech. Sciences, Prof., UIPA, Ukraine

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

*Myronenko E.V.*, Dr. Tech. Sciences, Prof., DDMA, Ukraine

*Михел Балол* (Балог, Михал), доцент, доктор філософії,

*Balog, Mikhal*, associate professor, Doctor of Philosophy,

Технический университет Кошице, Словачія

Košice Technical University, Slovakia

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

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

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

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

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

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

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

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

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

"ENERGOSTAL", Ukraine

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

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

*Ступницький В.М.*, д-р техн. наук, проф. Львівська «Політехна»

*Stupnytskyi V.M.*, Dr. Tech. Sciences, Prof. Lviv Polytechnic

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 27 березня 2026р., ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2026

*ДЕРГОУСОВ В. М., ПЕРМЯКОВ О. А., УСТИНЕНКО О. В.*

## ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСУ ТА ЗМЕНШЕННЯ ШУМУ РЕДУКТОРІВ РІЗАННЯ ОЧИСНИХ ВУГІЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Автори, маючи кожен свій досвід наукової та практичної діяльності та накопичені знання з машинознавства і технології машинобудування, поставили собі за мету узагальнення та оцінку причин зниження надійності та ресурсу, підвищених рівнів шуму зубчастих передач. Для розробки та впровадження рекомендацій, які в подальшому зможуть забезпечити підвищення працездатності і зменшення рівнів шуму, розглянуто особливості редукторів різання очисних вугільних комбайнів нового покоління, вимоги до експлуатаційних показників, які забезпечують їхню ефективність та конкурентоспроможність.

**Ключові слова:** очисний вугільний комбайн, редуктор різання, зубчата передача, працездатність, надійність, рівень шуму.

**DERGOUZOV V., PERMYAKOV O., USTYENENKO O.**

### ON PROVIDING RESOURCE AND REDUCING THE NOISE OF DRIVES OF CLEANING COAL HARVESTERS

The authors, each having their own experience in scientific and practical activities and accumulated knowledge in mechanical engineering and machine-building technology, set themselves the goal of summarizing and assessing the reasons for the reduction in reliability and service life, and the increased noise levels of gear transmissions. In order to develop and implement recommendations that can subsequently ensure improved performance and reduced noise levels, the features of the gearboxes of cutting mechanisms of new-generation coal shearers, as well as the requirements for operational indicators that ensure their efficiency and competitiveness, were considered.

**Keywords:** coal mining combine harvester, cutting gearbox, gear transmission, performance, reliability, noise level.

**Вступ.** Вугільна промисловість України потребує розробки та впровадження високоефективних очисних комбайнів нового покоління. Завдання з розробки високоефективних очисних комбайнів нового покоління полягало в проведенні комплексу науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт, організаційно-технологічної підготовки серійного виробництва та виведення на ринок нового продукту – очисного комбайну УКД200-500. Це перший комбайн нового технічного рівня для видобутку вугілля на тонких похилих пластах зі складною гіпсометрією. Від надійності та довговічності ріжучої частини, а саме її зубчастих передач, залежить надійність та довговічність роботи комбайна в цілому. Зубчасті передачі є одним з найбільш поширених елементів механічних приводів, що забезпечують передачу обертального руху та зміну крутного моменту. Однак за всіх своїх переваг, вони стають джерелом значного шуму та вібрацій, що може негативно позначитися на роботі обладнання, умовах праці та довговічності механізмів. Для ефективного вирішення зазначеної проблеми потрібен комплексний підхід з урахування всіх особливостей конструкції, технології виготовлення, причин зниження працездатності, надійності та ресурсу, можливих шляхів покращення експлуатаційних показників.

**Мета дослідження.** На основі системного аналізу можливих причин зниження надійності та ресурсу редукторів різання очисних вугільних комбайнів розглянути та впровадити рекомендації, які забезпечать підвищення працездатності і зменшення рівнів шуму зубчастих передач.

### Характеристики редукторів різання вугільнодобувних комбайнів нового покоління.

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

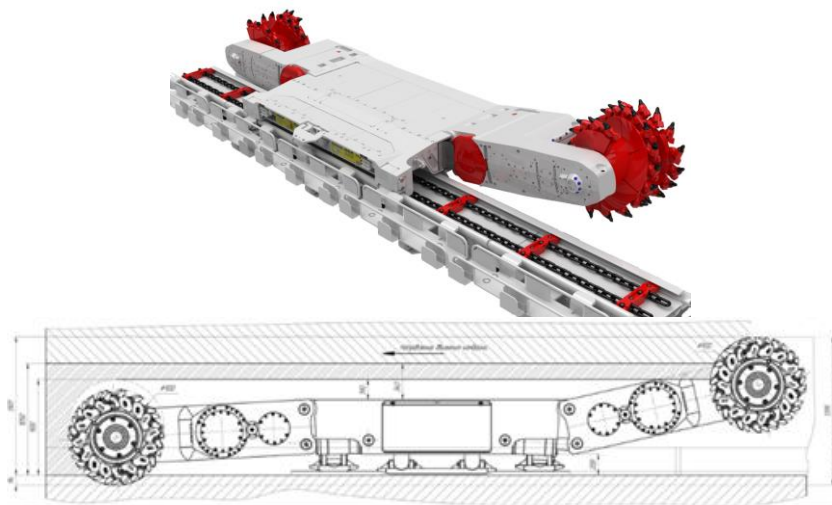


Рис. 1 – Загальний вигляд та схема роботи очисного комбайну при повному діапазоні вийманої потужності.

Проведені науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи дозволили створити високоефективну конструкцію очисного комбайна УКД200-500 з техніко-економічними показниками на рівні та краще світових зразків (табл.1) і забезпечити його серійне виробництво з гарантією стабільної якості, високій продуктивності та зниження трудомісткості виготовлення [1, 2]. Очисний комбайн УКД200-500 є універсальною машиною, яка може працювати у складі множини очисних комплексів.

Таблиця 1 – Технічні характеристики комбайна УКД200-500 у порівнянні із зарубіжними моделями

Назва показників	Значення показників очисних комбайнів				
	УКД200-500	KSE-360 (Польща)	MB290E (Чехія)	EDW300 LN (Германія)	MG132/315-WD (КНР)
Комбайн					
Придатність для діапазону пластів, м	0,85-1,5	0,9-1,9	1,0-2,1	1,0-2,0	0,95-1,7
Сумарна номінальна потужність електроприводу, кВт, в т.ч.	597,5	360	291,5	346	308
- привод виконавчого органу	2×220	2×150	2×120	1×300	2×132
- привод подачі	2×75	2×30	2×22	2×23	2×22
Номінальна напруга, В	1140	1000/500	1000/500	1000	1140
Діаметр виконавчого органу, м	0,8–1,0	0,9–1,4	0,95–1,25	0,90–1,8	0,85–1,0
Номінальна ширина захоплення, м	0,8	0,8	0,63; 0,8	0,8; 1,0	0,6-0,8
Максимальна швидкість подачі, м/хв	10,0	9,5	11,5	10,5	6,2
Максимальна тягове зусилля подачі, кН	300	376/470	440	352	280
Довжина по осях виконавчих органів, мм	5880	5790	7780	6674	7504
Висота по корпусу від ґрунту, мм	665	770	748	-	830
Маса комбайна, т	17,3	21,8	17,0	25,0	15,6

Під час експлуатації комбайн УКД200-500 демонструє високі показники середньодобового видобутку (2000–2500 т). Виробник АТ «ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД «КОРУМ СВІТЛО ШАХТАРЯ» гарантує надійну роботу очисного комбайну до капітального ремонту з видобутку не менш 1 млн.т вугілля, що вдвічі перевершує показники конкуруючих аналогів. Показники надійності та довговічності: розрахункова довговічність зубчастих передач та підшипникових вузлів – не менше 15000 годин; середній ресурс до капітального ремонту залежно від опірності вугілля різанню – не менше 800–1000 тис.т.

Особливістю очисного комбайну УКД200-500 є агрегатно-модульна конструкція та повна уніфікація редукторів різання (без лівого/правого виконання), від надійності та довговічності яких, а саме зубчастих передач, залежить надійність та довговічність роботи комбайна в цілому. Ріжуча частина комбайна представляє з себе трьохступеневий редуктор з електродвигуном (рис. 2).

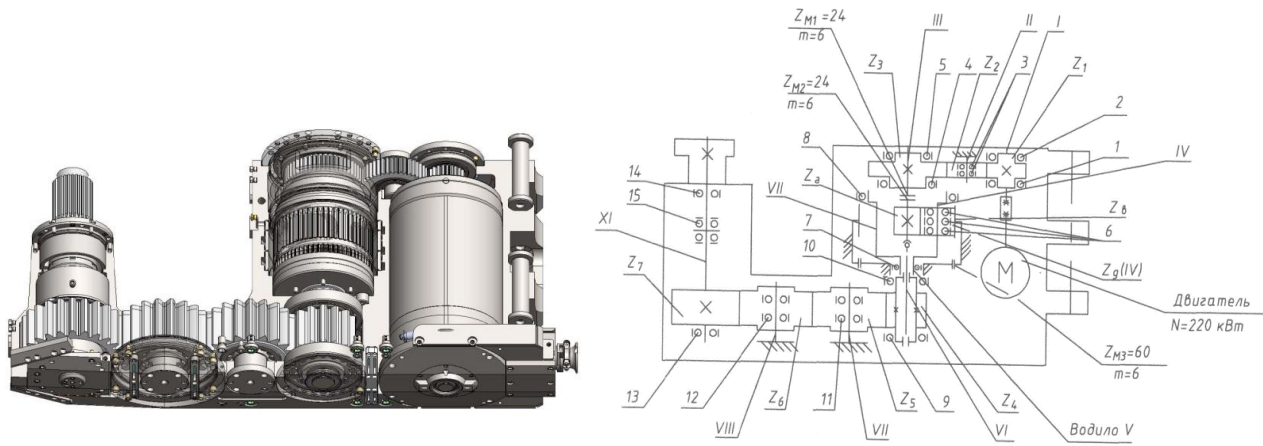


Рис. 2 – Корпус у розрізі та кінематична схема редуктора різання очисного комбайна УКД200-500.

У корпус редуктора вбудована триконтурна система охолодження із розділеними паралельними потоками. Охолодження швидкохідного ступеня циліндричної прямозубцевої передачі здійснюється шляхом вбудованого радіатора, планетарного ступеня за допомогою одноконтурної сорочки охолодження, тихохідного ступеня прямозубцевої циліндричної передачі через виконані в корпусі канали охолодження. Між другим і третім щаблем редуктора розташований зрізний елемент, у вигляді шлицевого валу, що виключає аварійний вихід з ладу елементів редукторної групи. Згладжування динамічних пікових навантажень здійснюється торсіонним валом, розташованим усередині валу ротора електродвигуна фірми DAMEL.

**Розуміння джерела шуму та методи зниження шуму під час роботи редуктора.**

Сучасні промислові редуктори є ключовими компонентами механічних систем передачі потужності, але їхня робота неминуче супроводжується генерацією шуму та вібрації. Рівень шуму промислових редукторів може досягати 105 дБА, що перевищує допустимі норми для робочих місць та потребує застосування засобів індивідуального захисту. Для робочих місць встановлено норми 80–85 дБА, понад 85 дБА роботи заборонено.

Надмірний шум вказує на тертя, неспіввісність або зношування, які можуть скоротити термін служби передач. Тривалий вплив сильного шуму також створює некомфортне та небезпечне робоче середовище. Генерація шуму в редукторах відбувається за складним механізмом, що включає кілька взаємозалежних процесів. Редуктор має змінну жорсткість зачеплення, що викликає вібрації. Ці вібрації передаються на корпус редуктора, який випромінює акустичну енергію в навколишнє середовище.

Для ефективного вирішення проблеми шуму необхідно розуміти механізми виникнення [3, 4]. Основні джерела шуму в зубчастих передачах можна розділити на кілька категорій (рис. 3).

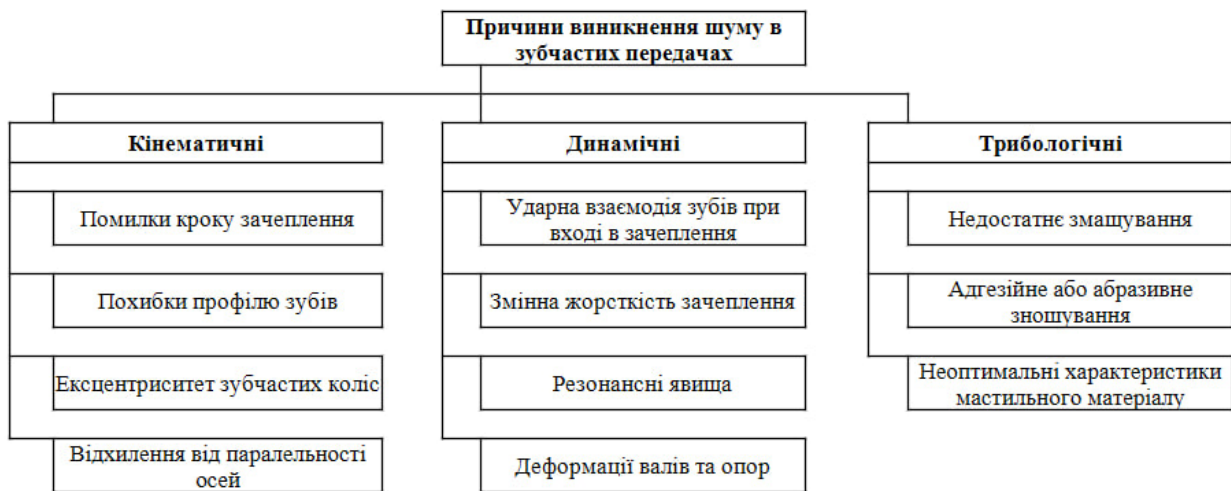


Рис. 3 – Причини виникнення шуму в зубчастих передачах.

Кінематичні причини пов'язані з геометрією зубців та похибками виготовлення, динамічні обумовлені змінними навантаженнями, трибологічні пов'язані з тертям та змащенням. Існуючі методи зниження шуму в зубчастих передачах можуть бути порівняні за можливою величиною потенційного зниження, складністю застосування, впливу на вартість та довговічність досягнутого ефекту (табл. 2).

Таблиця 2 – Методи зниження шуму в зубчастих передачах

Метод	Потенційне зниження шуму, дБА	Складність застосування	Вплив на вартість	Довговічність ефекту
Модифікація профілю зубів	2–6	Середня	Середнє	Висока
Перехід на косозубцеві передачі	4–7	Середня	Середнє	Висока
Підвищення точності виготовлення (на 2 ступені)	2–4	Висока	Висока	Висока
Застосування композитних матеріалів	5–10	Середня	Висока	Середня
Оптимізація мастила	1–5	Низька	Низьке	Потребує підтримки
Демпфування корпусу	3–8	Низька	Середнє	Середня
Віброізолюючі опори	3–10 (по структурному шуму)	Низька	Низьке	Середня
Застосування віброгасних муфт	2–5	Низька	Середнє	Середня

Важливо, що комплексне застосування різноманітних методів забезпечує синергетичний ефект. На практиці оптимальним є поєднання конструктивних, технологічних та експлуатаційних заходів [5–11]. Перш за все розглянемо конструктивні методи зниження шуму в зубчастих передачах. Виходячи з аналізу конструктивних та кінематичних параметрів зубчастих передач редуктора різання очисного комбайна УКД200-500, наведених на рис. 4, необхідно оцінити, як контактують між собою пари зубчастих коліс.

Друга камера  
прямозуба планетарна передача типу 2К-Н  
з трьома сателітами  
( $m=6, z_a=15; z_g=23; z_b=60$ )

Перша камера  
ступінь циліндричних прямозубих передач  
зовнішнього зачеплення  
( $m=6, z_1=23; z_2=43; z_3=50$ )

Підшипник  
192309



Третя камера  
ступінь циліндричних прямозубих передач  
зовнішнього зачеплення  
( $m=16, z_4=14, z_5=20, z_6=20, z_7=24$ )

Зрізний вал

Електродвигун потужністю 220кВт (S1)

Рис. 4 – Кінематичні параметри зубчастих передач редуктора різання очисного комбайна УКД200-500.

Для підвищення довговічності зубчастої передачі та зменшення локальних навантажень передусім бажано досягти рівномірного зносу зубців. Для цього необхідно забезпечити роботу зубців ведучого колеса з усіма зубцями веденого колеса. Суть простого методу полягає в тому, що кількість зубців ведучого та веденого коліс повинна бути взаємно простими числами (тобто їхній найбільший спільний дільник дорівнював 1). Найбільший спільний дільник (НСД) – це найбільше ціле число, на яке два або більше цілих чисел можна поділити без залишку. Якщо виконати умову, що у чисел зубців пари коліс немає спільних дільників, крім 1, тоді кожен зубець ведучого колеса обов'язково по черзі увійде в зачеплення з усіма зубцями веденого.

Аналіз конструкції редуктора та зубчастих передач ріжучої частини очисного комбайна УКД200-500 показує, що для циліндричних прямозубцевих передач зовнішнього зачеплення першої ступені дана умова повністю виконується (табл. 3).

Таблиця 3 — Показники циліндричних прямозубцевих передач першого ступеня редуктора

Передача/ступінь редуктора	Кількість зубців колеса		Передатне число передачі/ступеня редуктора	НСД
	Ведуче	Ведене		
$z_1/z_2$	23	43	1,870	1
$z_2/z_3$	43	50	1,163	1
Перша			2,174	

Навпаки, для циліндричних прямозубцевих передач зовнішнього зачеплення третього ступеня дана умова не виконується (табл. 4). Причому значення шестерні  $z_4=14$  визначалося з умов міцності зубця при модулі зачеплення  $m=16$ . Оскільки одним із ключових параметрів, що визначають якість роботи зубчастої передачі, є коефіцієнт торцевого перекриття  $\varepsilon_\alpha$ , який характеризує плавність роботи зубчастої передачі, було проаналізовано передачі третього ступеня редуктору за двома показниками та коефіцієнтами зміщення вихідного контуру зубчатих коліс.

З урахуванням міжосьової відстані зубчастих передач ріжучої частини очисного комбайна УКД200-500 (рис. 5) розглянемо можливі варіанти (табл. 5) зміни та підбору чисел зубців коліс третього ступеня щоб виконувалась вимога, коли кожен зубець ведучого колеса входив в зачеплення з усіма зубцями веденого. Причому Варіант 1 дозволить зберегти міжосьові відстані зубчастих передач та не потребує конструкційних змін корпусу редуктора різання. Підбір числа зубців коліс за Варіантом 2 потребує змін міжосьові відстані зубчастих передач. Але для цього варіанта вдалося підібрати коефіцієнти зміщення вихідного контуру, які забезпечують вирівнювання питомих швидкостей ковзання на ніжках зубців. Це позитивно позначається на зносостійкості передач.

Таблиця 4 — Показники циліндричних прямозубчих передач третього ступеня редуктора

Передача/ступінь редуктора	Кількість зубців колеса		Передатне число передачі/ступеня редуктора	НСД	Коефіцієнт перекриття $\varepsilon_\alpha$	Коефіцієнт зміщення вихідного контуру
	Ведуче	Ведене				
$z_4/z_5$	14	20	1,429	2	1,184	0,3/0,8
$z_5/z_6$	20	20	1,000	20	1,107	0,8/0,8
$z_6/z_7$	20	24	1,200	4	1,316	0,8/0
Третя			1,714			

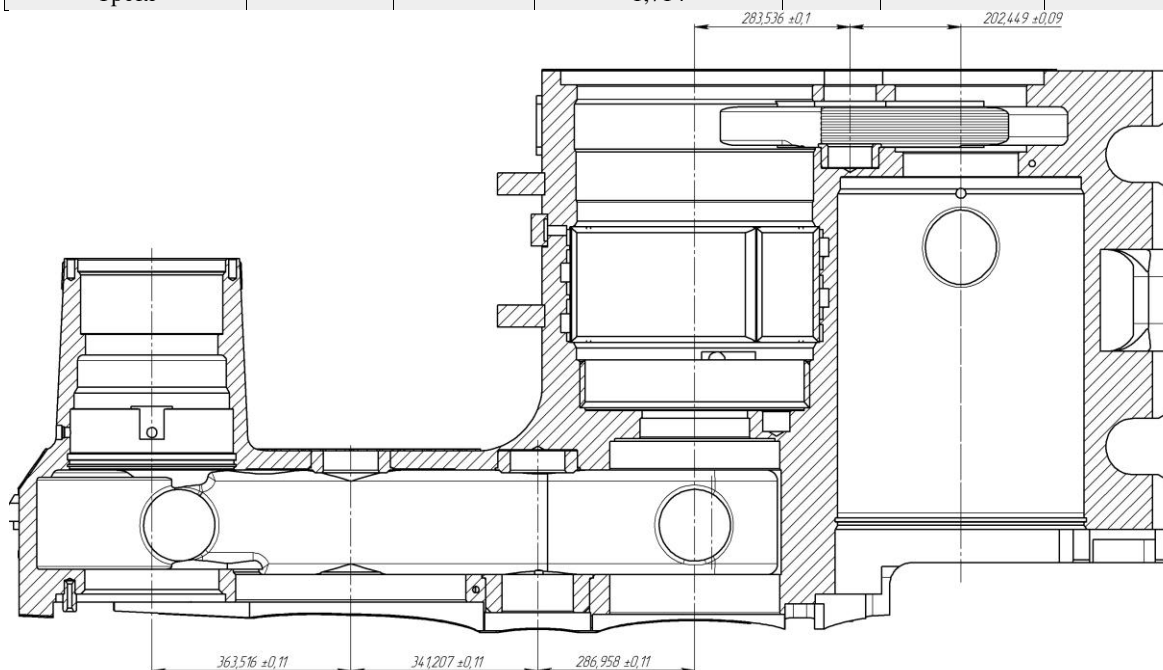


Рис. 5 – Ескіз корпусу редуктора різання очисного комбайна УКД200-500

Таблиця 5 — Варіанти зміни чисел зубців циліндричних прямозубцевих передач третього ступеня редуктора  
Варіант 1

Передача/ступінь редуктора	Кількість зубців колеса		Передатне число передачі/ступеня редуктора	НСД	Коефіцієнт перекриття $\varepsilon_\alpha$	Коефіцієнт зміщення вихідного контуру
	Ведуче	Ведене				
$z_4/z_5$	13	21	1,615	1	1,180	0,4/0,7
$z_5/z_6$	21	19	0,905	1	1,104	0,7/0,9
$z_6/z_7$	19	24	1,263	1	1,160	0,9/0,541
Третя			1,846			

Варіант 2

Передача/ступінь редуктора	Кількість зубців колеса		Передатне число передачі/ ступеня редуктора	НСД	Коефіцієнт перекриття $\varepsilon_\alpha$	Коефіцієнт зміщення вихідного контуру
	Ведуче	Ведене				
$z_4/z_5$	17	20	1,176	1	1,405	0,256/0,146
$z_5/z_6$	20	19	0,950	1	1,423	0,146/0,255
$z_6/z_7$	19	29	1,526	1	1,474	0,255/0,141
Третя			1,706			

За загальноприйнятими рекомендаціями евольвентна зубчаста передача з прямозубцевими колесами повинна мати коефіцієнт перекриття  $\varepsilon_\alpha = 1,1 - 1,5$ . Значення  $\varepsilon_\alpha < 1,1$  є недоречним, оскільки в цьому випадку можливі моменти, коли жодна пара зубців не знаходиться в зачепленні, що призведе до ударів і швидкого зносу. З оцінки того, як контактують між собою пари зубчастих коліс за розглянутими варіантами, можна робити висновки та приймати рішення з удосконалення конструктивних та кінематичних параметрів зубчастих передач ріжучої частини очисного комбайна УКД200-500 (табл. 6).

Таблиця 6 — Порівняння варіантів числа зубців та умов контакту коліс третьої ступені редуктору

Варіант	Кожен зуб ведучого колеса увійде в зачеплення з усіма зубцями веденого	Значення коефіцієнту перекриття $\varepsilon_\alpha$	Потребує змін корпусу	Потенційне зниження шуму
Базовий (існуючий)	ні	1,107–1,316	ні	Низьке
Варіант 1	так	1,104–1,18	ні	Середнє
Варіант 2	так	1,405–1,474	так	Високе

**Висновки.** На основі системного аналізу можливих причин зниження надійності та ресурсу редукторів різання очисних вугільних комбайнів розглянуто та запропоновано рекомендації, які забезпечать підвищення працездатності та зменшення рівнів шуму зубчастих передач. Заплановано шляхи нівелювання недоліків при використанні прямозубцевих передач редукторів різання за рахунок підбору кінематичних параметрів коліс, а саме, щоб кількість зубців ведучого та веденого коліс були взаємно простими числами, а їхній найбільший спільний дільник дорівнював 1. Це забезпечить роботу зубців ведучого зубчастого колеса з усіма зубцями веденого зубчастого колеса та їхній рівномірний знос, зменшення локальних навантажень, що може підвищити довговічність зубчастих передач редукторів різання очисного комбайна УКД200-500. Розглянуто декілька варіантів конструкційних змін, від незначних до корінних. Простіші потребують розрахунку передач з корегуванням профілю та виготовленню відповідних зубчастих коліс редуктору, дозволять зберегти міжосьові відстані зубчастих передач та не потребують конструкційних змін корпусу редуктора різання. Перспективний варіант корінних конструкційних змін потребує незначних змін міжосьових відстаней зубчастих передач, але дасть синергетичний ефект по підвищенню плавності роботи та працездатності, зменшенню вібрацій і рівнів шуму зубчастих передач при збереженні масогабаритних показників редукторів різання очисного комбайна УКД200-500.

#### Список літератури:

1. Створення та освоєння серійного виробництва очисних комбайнів нового покоління для гірничодобувної промисловості. України /О.М.Ковальчук, Р.А. Бережний, О.О. Клочко, В.В. Нежебовський, О.А. Пермяков, С.В. Рябченко, О.В. Устиненко // Промисловість в фокусі: Інформаційно-аналітичний Міжнародний технічний журнал. – Харків: Грудень №12(108) 2021- С. 40-44.
2. O. Koval'chuk, R. Berezhnyj, V. Nezhebovs'kyj, O. Ustylenko. Analysis of Tense-ness and Durability of the Main Parts for the Cutting Part of UKD 200-500 Coal Shearer. Різання та інструменти в технологічних системах [Cutting and Tools in Technological Systems]. № 95 (2021), с. 71–79. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.95.08>
3. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки.

4. DSTU ГОСТ 23941:2004 Шум машин. Методи визначання шумових характеристик. Загальні вимоги.
5. Рациональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів з урахуванням рівня напруженості зубчастих передач /Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Сериков В.І. //Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Сер. "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2015. – №35. – С.23–27.
6. Приклад раціонального проектування зубчастого циліндричного двоступінчастого редуктору методом псевдовипадкового пошуку при багатьох критеріях /Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Сериков В.І. //Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Х. : НТУ "ХПІ", 2018. – №25 (1301). – С.31–35.
7. Можливість використання та адаптація генетичних алгоритмів для раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач /Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Сериков В. . // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Х. : НТУ "ХПІ", 2019. – №7 (1332). – С.23–29.
8. Декларативний пат. на корисну модель у 2018 02191 UA, МПК F16H 5i9/04 (2016.01). Спосіб забезпечення контактування зубів ведучої шестерні з зубами веденого колеса /В.Д.Ковальов, О.О.Клочко, Д.О.Кравченко, О.М.Шелковий, О.А.Пермяков, М.І.Гасанов, А.О.Скоркін, О.Л.Кондратиук. – 4 с. : ил
9. Обработка зубчатых колес редукторов вугледобувних комбайнів /О.М.Ковальчук, В.М.Дергоусов, В.В.Нежебовський, О.А.Пермяков, О.О.Клочко, С.В. ябченко, Г.В.Середа //Оборудование и инструмент для профессионалов: Международный информационно-технический журнал. – Харьков: ИИД «ЦентрИнформ», 2021, № 5(238), - С. 38-39.
10. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну УКД200-500 нового покоління /Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Клочко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.
11. Про технологічне забезпечення виготовлення зубчастих передач редукторів вугільних комбайнів в умовах дрібносерійного виробництва /Дергоусов В.М., Нежебовський В.В., Клочко О.О., Пермяков О.А. //Нові та нетрадиційні технології в ресурсо - та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 91 –92.

#### References (transliterated):

1. Stvorennia ta osvoinnia seriinoho vyrobnytstva ochysnykh kombainiv novoho pokolinnia dlia hirnychodobuvnoi promyslovosti. Ukrainy /O.M.Kovalchuk, R.A. Berezhnyi, O.O. Klochko, V.V. Nezhebovskiy, O.A. Permiakov, S.V. Riabchenko, O.V. Ustynenko //Promyslovist v fokusi: Informatsiino-analitychnyi Mizhnarodnyi tekhnichnyi zhurnal. – Kharkiv: Hruden №12(108) 2021- S. 40-44.
2. O. Koval'chuk, R. Berezhnyj, V. Nezhebovskiy, O. Ustynenko. Analysis of Tense-ness and Durability of the Main Parts for the Cutting Part of UKD 200-500 Coal Shearer. Різання та інструменти в технологічних системах [Cutting and Tools in Technological Systems]. № 95 (2021), с. 71–79. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.95.08>
3. HOST 12.1.003-83. SSBT. Shum. Zahalni vymohy bezpeky.
4. DSTU HOST 23941:2004 Shum mashyn. Metody vyznachannia shumovykh kharakterystyk. Zahalni vymohy.
5. Ratsionalne proektuvannia zubchastykh tsylindrychnykh dvostupinchastykh reduktoriv z urakhuvanniam rivnia napruzhenosti zubchastykh peredach /Bondarenko O.V., Ustynenko O.V., Sierykov V.I. //Visnyk NTU "KhPI": Zb. nauk. prats. Ser. "Problemy mekhanichnoho pryvodu". – Kharkiv, 2015. – №35. – S.23–27.
6. Pryklad ratsionalnoho proektuvannia zubchastoho tsylindrychnoho dvostupinchastoho reduktoru metodom psevdovypadkovoho poshuku pry bahatokh kryteriiakh /Bondarenko O.V., Ustynenko O.V., Sierykov V.I. //Visnyk NTU "KhPI". Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR. – Kh. : NTU "KhPI", 2018. – №25 (1301). – S.31–35.
7. Mozhylyvist vykorystannia ta adaptatsiia henetychnykh alhorytmiv dlia ratsionalnoho proektuvannia zubchastykh tsylindrychnykh reduktoriv ta korobok peredach /Bondarenko O.V., Ustynenko O.V., Sierykov V. . // Visnyk NTU "KhPI". Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR. – Kh. : NTU "KhPI", 2019. – №7 (1332). – S.23–29.
8. Deklaratyvnyi pat. na korysnu model u 2018 02191 UA, МПК F16H 5i9/04 (2016.01). Sposib zabezpechennia kontaktuvannia zubiv veduchoi shesterni z zubamy vedenoho kola /V.D.Kovalov, O.O.Klochko, D.O.Kravchenko, O.M.Shelkovyi, O.A.Permiakov, M.I.Hasanov, A.O.Skorkin, O.L.Kondratiuk. – 4 s. : yl
9. Obrobka zubchastykh kolis reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv /O.M.Kovalchuk, V.M.Derhousov, V.V.Nezhebovskiy, O.A.Permiakov, O.O.Klochko, S.V. yabchenko, H.V.Sereda //Oborudovanye y ynstrument dlia professyonalov: Mezhdunarodnyi ynformatsyonno-tekhnicheskyy zhurnal. – Kharkov: YYD «TsentrYnform», 2021, № 5(238), - S. 38-39.
10. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia /Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. //Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 7–15. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.
11. Pro tekhnolohichne zabezpechennia vyhotovlennia zubchastykh peredach reduktoriv vuhilnykh kombainiv v umovakh dribnoseriinoho vyrobnytstva /Derhousov V.M., Nezhebovskiy V.V., Klochko O.O., Permiakov O.A. //Novi

ta netradytsiini tekhnolohii v resurso - ta enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 6-7 hrudnia 2023 r., m. Odesa. – Odesa: 2023. – S. 91 –92.

Надійшла (received) 30.02.2026

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Дергоусов Вадим Миколайович (Dergousov Vadim)** – Генеральний директор АТ «ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД «КОРУМ СВІТЛО ШАХТАРЯ», м. Харків; e-mail: [svet@shaht.kharkov.ua](mailto:svet@shaht.kharkov.ua). ORCID: 0000-0002-0199-6589.

**Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [perm\\_a@i.ua](mailto:perm_a@i.ua), ORCID: 0000-0002-9589-0194.

**Устиненко Олександр Віталійович (Ustynenko Oleksandr)** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [ustin1964@tmm-sapr.org](mailto:ustin1964@tmm-sapr.org); ORCID: 0000-0002-6714-6122.

**КОНДРАТЮК О. Л., СКОРКІН А. О., СКОРКІНА В. О., ГОРБУЛИК В. І.**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ТОЧІННІ**

Сучасний розвиток машинобудування характеризується постійним прагненням до інтенсифікації виробничих процесів. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення продуктивності металообробки є перехід до швидкісного та високошвидкісного точіння. Теоретичною основою цього процесу є зміна фізико-механічних явищ у зоні різання при збільшенні швидкості ( $V_{різ}$ ).

На відміну від традиційної обробки, швидкісне різання супроводжується специфічним розподілом теплових потоків та зміною характеру пластичної деформації матеріалу заготовки.

Сутність процесу полягає в тому, що при критичних швидкостях швидкість відведення тепла зі стружкою випереджає швидкість теплопровідності в тіло деталі. Це дозволяє досягти високої якості поверхні та точності розмірів, оскільки заготовка практично не зазнає термічного розширення. Проте зворотним боком високої продуктивності є екстремальне теплове навантаження на різальну кромку інструмента, що висуває жорсткі вимоги до його міцнісних та експлуатаційних характеристик.

Хоча при швидкісному точінні питома кількість теплоти від кожної частинки стружки, що потрапляє на різець, зменшується через скорочення часу контакту, сумарна кількість теплової енергії, що акумулюється в інструменті за одиницю часу, суттєво зростає. Це призводить до інтенсивного термомеханічного руйнування твердосплавних пластин.

Необхідне подальше вивчення механізмів теплорозподілу та деформаційних процесів (зокрема, зменшення усадки стружки) для створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору марок твердих сплавів для різальних пластин та їхньої геометрії.

Таким чином, розробка методів оптимізації стійкості токарних різців при переході до високопродуктивної обробки є критично важливим завданням для сучасного автоматизованого виробництва, що й визначає напрям даного дослідження.

**Ключові слова:** високошвидкісна обробка, твердосплавні пластини, стійкість інструменту, тепловий баланс, усадка стружки, швидкісне точіння, термостійкість, продуктивність різання

**KONDRATYUK O., SKORKIN A., SKORKINA V., GORBULYK V.**

## **IMPROVING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A CARBIDE TOOL IN HIGH-SPEED TURNING**

The modern development of mechanical engineering is characterized by a constant desire to intensify production processes. One of the most promising directions for increasing the productivity of metalworking is the transition to high-speed and high-speed turning. The theoretical basis of this process is the change in physical and mechanical phenomena in the cutting zone with increasing speed ( $V$ ).

Unlike traditional machining, high-speed cutting is accompanied by a specific distribution of heat flows and a change in the nature of plastic deformation of the workpiece material.

The essence of the process is that at critical speeds the rate of heat removal with chips exceeds the rate of heat conduction into the body of the part. This allows you to achieve high surface quality and dimensional accuracy, since the workpiece practically does not undergo thermal expansion. However, the downside of high productivity is the extreme thermal load on the cutting edge of the tool, which places strict requirements on its strength and operational characteristics.

Although during high-speed turning the specific amount of heat from each chip particle hitting the cutter decreases due to the reduction of contact time, the total amount of thermal energy accumulated in the tool per unit of time increases significantly. This leads to intensive thermomechanical destruction of carbide inserts.

Further study of the mechanisms of heat distribution and deformation processes (in particular, reduction of chip shrinkage) is necessary to create scientifically based recommendations for the selection of grades of carbides for cutting inserts and their geometry.

Thus, the development of methods for optimizing the stability of turning cutters during the transition to high-performance machining is a critically important task for modern automated production, which determines the direction of this research.

**Purpose.** The purpose of the work is to determine the physical and thermal regularities of the high-speed turning process in order to develop methods for increasing the strength and wear resistance of carbide tools under conditions of intensive heat generation.

**Methods.** The study is based on theoretical and experimental analysis of the dynamics of chip formation and heat transfer in the cutting zone; comparative analysis of chip shrinkage and power parameters at different machining speeds; modeling of the distribution of heat flows between the workpiece, tool and chip.

**Results.** It was established that during high-speed machining, heat localization occurs in the chip due to a decrease in the degree of metal deformation and a reduction in the contact time of the particles with the cutter. It was confirmed that despite the decrease in heat input from a single chip particle, the total thermal load on the cutting edge increases due to an increase in the volume of processed material per unit of time, which requires specific approaches to tool strengthening.

**Conclusions.** High-speed cutting provides favorable heat distribution (minimum heating of the part), but creates critical temperature conditions for the cutting edge. Optimizing cutter durability when transitioning to high-performance machining should be based on the use of materials and coatings that can withstand the intense accumulation of thermal energy in the tool body.

**Keywords:** high-speed machining, carbide inserts, tool stability, thermal balance, chip shrinkage, high-speed turning, heat resistance, cutting performance

**Вступ.** Різання металів на великих швидкостях до теперішнього часу отримало теоретичне обґрунтування і широко застосовується на металорізальних верстатах. Це досягнуто об'єднаними зусиллями вітчизняних вчених, інженерів-виробничників, таких як: К.О. Зворикін, Ю.В. Петраков, Р.Д. Пашенко, В. В. Туркевич, С.Г. Кірієнко, та багатьох інших, а також фахівців компанії Sandvik Coromant та Kennametal.

Сутність високошвидкісної обробки металів полягає в тому, що з підвищенням швидкості різання зменшується ступінь деформації металу в процесі стружкоутворення, що підтверджується, зокрема, зменшенням усадки стружки і сили різання при швидкісному точінні. Зменшення деформації в окремих частинках стружки зумовлює зменшення кількості теплоти, що утворюється у процесі різання в кожній частинці. Крім того, кожна частка стружки при високій швидкості різання стикається з передньою поверхнею різця протягом меншого часу, ніж при порівняно низькій швидкості.

Завдяки цьому при швидкісному точінні з кожної окремої частинки стружки в різець надходить менше теплоти, ніж при низькій швидкості різання.

При збільшенні швидкості різання зменшується і кількість теплоти, що переходить зі стружки в оброблану деталь. Дослідами добре підтверджується, що при високих швидкостях різання оброблена поверхня нагрівається лише трохи.

Таким чином, при високій швидкості різання розподіл теплоти, що утворилася, сприятливіший, ніж при помірних швидкостях; у стружці, що вийшла при високій швидкості різання, залишається теплоти більше, ніж при низькій швидкості.

Незважаючи на позитивне значення підвищення швидкості різання, умови роботи різальної кромки різця при швидкісному різанні важчі, ніж при менш високих швидкостях. Хоча кількість теплоти, що надходить у різець з кожної частинки стружки при швидкісному різанні, менша, ніж при помірних швидкостях різання, загальна кількість теплоти, яка надійде в різець за той самий час його роботи, буде більшою за високої швидкості різання, ніж за низької. Це пояснюється тим, що в першому випадку різець отримує теплоту з більшої кількості частинок стружки, ніж за такий самий час при невисокій швидкості.

В результаті при швидкісному різанні різець нагрівається значно більше, ніж при роботі з помірною швидкістю різання. Тому розвиток швидкісного різання зумовив необхідність подальшого підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання підвищення ефективності токарної обробки на високих швидкостях протягом десятиліть залишається в центрі уваги провідних наукових шкіл. Теоретичне обґрунтування переваг швидкісного різання було закладено ще у класичних працях К. Саломона, який експериментально довів можливість зниження сил різання та температури в зоні контакту при переході за критичний поріг швидкості.

Фундаментальні дослідження термодинаміки та теплофізичних процесів у зоні різання висвітлені в роботах А. С. Манохіна, Ю. О. Мельничука, [13]. Ними було встановлено, що стійкість інструмента критично залежить від температурного балансу, а інтенсивність теплообміну між стружкою та різцем визначає характер зношування передньої поверхні пластини. Зокрема, О. Макаров обґрунтував концепцію «оптимальних температур», за яких зносостійкість твердого сплаву є максимальною.

Сучасний етап досліджень, представлений працями Ю. В. Петракова [6], В. О. Залози [9], В. Ф. Новікова [11], зосереджений на математичному моделюванні процесів у зоні ВШО (високошвидкісної обробки). Автори зазначають, що при переході до високих швидкостей головним чинником виходу інструмента з ладу стає не механічне стирання, а дифузійний знос та термічне розм'якшення зв'язки твердого сплаву.

Дослідники школи НТУУ «ХПІ» та ДДМА (зокрема В. Гусев) приділяють значну увагу динамічній стійкості системи ВІДЗ (Верстат-Інструмент-Деталь-Заготовка). У їхніх роботах доведено, що вібрації на високих частотах обертання шпинделя суттєво знижують міцність твердосплавних пластин, що потребує оптимізації геометрії різальної частини [12].

Вагомий внесок у практичну реалізацію високопродуктивної обробки зробили інженери провідних інструментальних компаній, таких як Sandvik Coromant та Kennametal. Їхні публікації підтверджують, що застосування багат шарових зносостійких покриттів (TiAlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), нанесених методами PVD та CVD, дозволяє частково нівелювати негативний вплив теплової акумуляції в корпусі різця, про який йшлося у вихідних теоретичних положеннях [1-5].

«Аналіз сучасних публікацій свідчить, що більшість робіт традиційно зосереджені на оцінці загальної зносостійкості та динаміки сил різання. Проте, незважаючи на значну кількість напрацювань, питання комплексного впливу зменшення деформації металу та перерозподілу теплових потоків на втому твердосплавного матеріалу при тривалій експлуатації залишається недостатньо висвітленим. Особливою гостротою ця проблема набуває в режимах швидкісного точіння, де екстремальні температурно-силові параметри зони контакту стають визначальними для втомної довговічності інструменту.

Разом з тим, недостатньо дослідженим залишається поєднаний вплив інноваційних покриттів (DLC і TiN) та кінематичних параметрів обертання осевого роторного інструменту на мікрогеометрію готової поверхні. Зокрема, питання багатопрхідного полірування в умовах використання РКМ потребують деталізації в частині стабільності формування зовнішнього вигляду деталі при критичних швидкостях обробки, що й обумовлює необхідність даного дослідження».

**Мета дослідження.** Мета роботи полягає у встановленні фізико-термічних закономірностей перерозподілу теплових потоків та динаміки стружкоутворення при високошвидкісному точінні для наукового обґрунтування методів підвищення термомеханічної стійкості твердосплавного інструменту шляхом застосування функціональних покриттів, здатних протистояти критичному акумулюванню теплової енергії на різальній кромці.

**Основна частина.** Впровадження високошвидкісного точіння у сучасне виробництво супроводжується специфічним фізичним парадоксом. З одного боку, підвищення швидкості різання веде до позитивних змін у зоні обробки: знижується ступінь пластичної деформації металу, зменшується усадка стружки та силові навантаження, а більша частина теплоти виноситься зі стружкою, не нагріваючи деталь. Це відкриває можливості для досягнення високої точності та якості поверхні.

З іншого боку, виникає критична проблема екстремальної теплової інтенсивності на різальній кромці. Хоча кожна окрема частинка стружки контактує з різцем менше часу, сумарний потік теплової енергії, що проходить крізь передню поверхню пластини за одиницю часу, зростає пропорційно швидкості обробки. В результаті різець нагрівається значно інтенсивніше, ніж при традиційних режимах, що призводить до:

- термічного розм'якшення твердосплавної основи та втрати її вихідної міцності;
- прискорення дифузійних процесів зношування;
- передчасного виходу інструменту з ладу через крихке руйнування різальної кромки.

Таким чином, головна проблема полягає у відсутності збалансованих режимів та методик, які б дозволяли повною мірою використовувати переваги швидкісного точіння (високу продуктивність та якість), мінімізуючи при цьому термічну деградацію твердосплавних пластин. Існує нагальна потреба у визначенні параметрів, за яких фізичне зміцнення інструменту та правильний розподіл теплових потоків забезпечать стабільну стійкість різця при переході до високопродуктивної обробки. При цьому характер зношування твердосплавних пластин трансформується з переважно абразивного в термохімічний та втомний. Основними видами деградації різальної кромки, що обмежують стійкість інструменту, є:

1. Інтенсивне лункоутворення на передній поверхні: через високу швидкість сходження стружки та концентрацію теплового потоку в зоні контакту відбувається вимивання частинок карбідів. Це призводить до утворення глибокої лунки, яка послаблює різальну кромку, викликаючи її раптове сколювання.

2. Дифузійне зношування: при критичних температурах (понад 800–1000°C), характерних для швидкісного точіння, активізується взаємне розчинення хімічних елементів інструментального та оброблюваного матеріалів. Атоми вольфраму та кобальту дифундують у стружку, що призводить до швидкої втрати твердості поверхневого шару пластини.

3. Пластична деформація різальної кромки: під дією одночасного впливу високого тиску та критичних температур зв'язка твердого сплаву (кобальт) розм'якшується. Різальна кромка починає «плисти», втрачаючи свою геометричну форму, що миттєво погіршує якість обробленої поверхні та точність деталі.

4. Термічне розтріскування (термовтома): циклічне нагрівання та охолодження кромки (особливо при переривчастому різанні або нерівномірній подачі МОР) спричиняє появу сітки мікротріщин, перпендикулярних до різальної кромки. Це призводить до мікросколювань та повного руйнування пластини задовго до її природного абразивного зносу.

Саме домінування перелічених видів зносу при високих швидкостях різання зумовлює необхідність пошуку нових шляхів підвищення термостійкості інструменту. Оптимізація має бути спрямована на створення такого теплового балансу, при якому інтенсивність дифузії та пластичної деформації буде мінімізована за допомогою раціонального вибору геометрії та зносостійких бар'єрних покриттів.

Одним із заходів, спрямованих на підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців, стало поліпшення якості твердих сплавів, що було здійснено шляхом:

1. Створення дрібнозернистих та наноструктурованих сплавів: зменшення розміру зерен карбиду вольфраму до субмікронного рівня дозволило одночасно підвищити і твердість, і міцність сплаву.

Сплави серії ISO P10–P20 з дрібним зерном краще протистоять крихкому руйнуванню при високих швидкостях, ніж застарілі крупнозернисті аналоги.

2. Легування тугоплавкими карбідами: додавання карбідів титану (TiC) та танталу (TaC) підвищило температуру червоностійкості.

Сплави титано-вольфрамової групи (наприклад, T15K6) дозволяють працювати при температурах у зоні різання на 200–300°C вищих, ніж однокарбідні вольфрамові сплави (BK8).

3. Застосування багатшарових зносостійких покриттів: нанесення тонких шарів (5–15 мкм) керамічних сполук методами CVD або PVD створює термічний бар'єр.

Покриття Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (оксид алюмінію) має низьку теплопровідність, що захищає твердосплавну основу від перегріву, а шар TiN (нітрид титану) знижує тертя та інтенсивність лункоутворення.

4. Використання градієнтних структур: створення пластин, де поверхневий шар збагачений на кобальт (Cobalt Enrichment).

Це дозволяє отримати дуже тверду поверхню для спротиву дифузійному зносу при збереженні в'язкої серцевини, яка гасить вібрації та удари на великих швидкостях.

Іншим способом підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців є застосування негативного переднього кута різця. Різальна здатність твердосплавних різців із позитивним кутом обмежується схильністю твердосплавних пластинок до викришування. Це викришування особливо помітне при обточуванні дуже твердих або загартованих сталей і при роботі з ударним навантаженням (переривчасте точіння, точіння з нерівномірним припуском тощо).

При негативному передньому куті викришування пластини, як правило, не відбувається, що пояснюється такими факторами:

- 1) при точінні різцями з негативним переднім кутом ( $-\gamma$ ) напрямок діючої сили  $P_u$  зумовлює стиск (рис. 1, а) і забезпечує більш сприятливі умови роботи пластинки твердого сплаву порівняно з умовами роботи різця з позитивним ( $+\gamma$ ) переднім кутом (рис. 1, б);
- 2) при негативному передньому куті і позитивному куті нахилу різальної крайки вершина різця захищена

від ударів при обточуванні переривчастих поверхонь;

3) усе сказане вище стосується головним чином обробки сталі. Різання чавуну та кольорових металів вимагає значно менших витрат; переваги негативних кутів у цьому разі позначаються слабше. Внаслідок цього для обробки зазначених матеріалів різці з негативними передніми кутами застосовуються рідше.

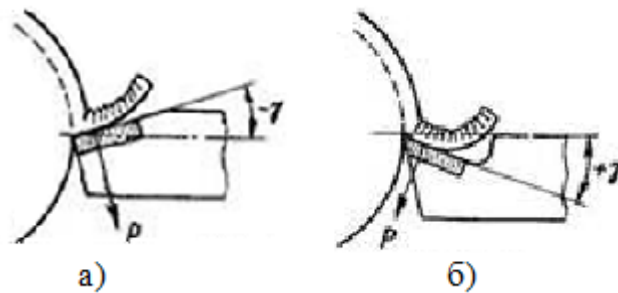


Рис. 1 – Тиск стружки на різець при негативному (а) та позитивному (б) передніх кутах

Поряд з перевагами різці з негативним переднім кутом мають низку значних недоліків.

1. При точінні різцями з негативним переднім кутом зростає сила тертя стружки об різець, внаслідок чого збільшується і потрібна потужність. Тому при роботі на недостатньо потужних верстатах доводиться зменшувати швидкість різання або подачу, а разом з тим і продуктивність.

2. При роботі різцями, що розглядаються, зростає радіальна сила  $P_y$ , що призводить до спотворення форми оброблюваної деталі (при її недостатній жорсткості), вібраціям тобто. З огляду на це різці з негативним переднім кутом застосовуються лише для обробки сталі з підвищеною і високою міцністю ( $\sigma_b = 800 \text{ Н/м}^2$ ) заготовок із дуже твердим поверхневим шаром. Останнім часом прагнуть і в таких випадках користуватися різцями з позитивним кутом.

*Точіння з великими подачами (силове різання).*

Можливість підвищення продуктивності звичайного токарного верстата за рахунок збільшення швидкості різання часто обмежується недостатньо великою кількістю обертів шпинделя. Підвищення продуктивності верстата шляхом збільшення подачі при обточуванні прохідними різцями зі звичайною геометрією також не вдається. В цьому випадку шорсткість поверхні настільки зростає, що часто виявляється необхідним подальше чистове обточування деталі з невеликою подачею; це зводить нанівець підвищення продуктивності, досягнуте роботою з великою подачею при чорновому обточуванні.

Підвищення продуктивності при чистовому обточуванні допомогою широкого різця, встановленого таким чином, що ріжуча кромка його паралельна напрямку подачі, іноді дуже істотно. Але такі різці можуть працювати без вібрацій лише при дуже малих глибинах різання, що виключає можливість застосування цього способу обробки при порівняно великих припусках на чистове обточування. Токар-новатор Харківського верстатобудівного заводу «Харверст» В. А. Колесов запропонував поєднувати чорнове та чистове обточування в одному переході, використовуючи при цьому спеціальний комбінований різець. Цей спосіб набув широкого поширення і популярності як спосіб силового різання.

Різець такої конструкції має три ріжучі кромки. (рис. 2).

Перша ріжуча кромка з кутом у плані  $45^\circ$  виконує роботу звичайного прохідного різця; друга ріжуча кромка з кутом у плані  $20^\circ$  є перехідною; третя з кутом у плані  $0^\circ$ , тобто паралельна напрямку подачі, виконує завдання чистового різця, що застосовується при великих подачах. Рекомендовані кути заточування та довжина додаткової ріжучої кромки наведені в табл. 1.

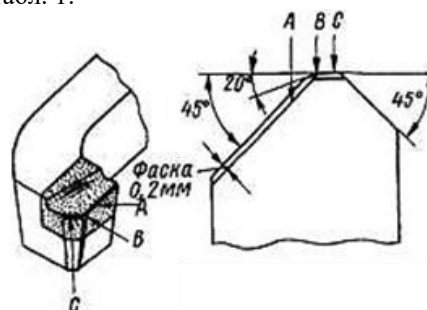


Рис. 2 – Різець конструкції В. А. Колесова

Цими різцями можна обробляти деталі навіть при порівняно великих глибині різання та подачі, отримуючи шорсткість обробленої поверхні за 4–5-м класом чистоти. Колесов обточував пінолі задньої бабки токарного верстата при швидкості різання 150 м/хв, глибині різання 1,7–2 мм і подачі 2,7 мм/об замість подачі, що застосовувалася раніше, 0,3–0,5 мм/об. Машинний час обробки було знижено майже в 10 разів.

Найбільш значним фактором різкого підвищення продуктивності при силовому різанні є поєднання чорнового та чистового переходів при одночасному збільшенні подачі.

Практика застосування таких різців показала, що вони мають підвищену в порівнянні зі звичайними різцями стійкістю. Це пояснюється тим, що при обробці однієї і тієї ж деталі довжина шляху, що проходить таким різцем по поверхні деталі, менше шляху, який проходить звичайний різець, у стільки ж разів, скільки подача більше, ніж при звичайному різці.

Таблиця 1- Геометричні параметри різця конструкції В. А. Колесова

Матеріал, що обробляється			Переріз зрізу у мм	Кути в град				Довжина додаткової ріжучої кромки $l$ мм. ( $s$ – подача мм/об)
Назва	Механічні властивості			$\gamma$	$\alpha$	$\varphi$	$\lambda$	
	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	НВ						
Сталь	до 700	-	до 7	7	10	45	-7	$(1,2 \div 1,8) s$
	понад 700	-		3,5	8	45	-3,5	
Чавун	-	до 220	5	8	45	-5		
Сталь	до 700	-	понад 7	5	8	45	0	1,2 $s$
	понад 700	-		3,5	6	45	+3,5	
Чавун	-	до 220	7	6	45	0		
Сталь	-	до 220-	Для всіх розмірів зрізу (при $\varphi = 90^\circ$ )	5	8	90	0	$(1,2 \div 1,8) s$
Чавун	-			3	8	90	0	

*Стружколомання при точінні.* При точінні сталі твердосплавними різцями з високою швидкістю різання особливе значення має подрібнення стружки, що забезпечує зручність та безпеку обслуговування верстата.

універсального засобу для подрібнення стружки поки не існує, тому кожен із способів розв'язання цього завдання має більш-менш обмежене застосування.

Ламання стружки може бути досягнуто збільшенням глибини різання чи подачі. У тому й іншому випадку стружка стає більш ламкою. Але збільшення глибини різання обмежується припуском на обробку, а збільшення подачі - потужністю верстата, міцністю механізму подачі та жорсткістю системи ВПД, а іноді і заданою шорсткістю.

Для дроблення стружки на передній поверхні різця іноді робиться уступ, розташований паралельно ріжучій кромці (рис. 3, а) або під кутом 5-150° до неї (рис. 3, б), з розширенням уступу до вершини різця. Стружка, що знімається за такої форми уступу, ламається короткими шматками у вигляді завитків. Кут уступу рекомендується робити в межах 110-115°. Розмір  $h$  - висота уступу приймається в залежності від глибини різання та подачі в межах 0,6-1,5 мм. Розмір  $k$  - ширина уступу залежно від тих самих факторів вибирається по табл. 2.

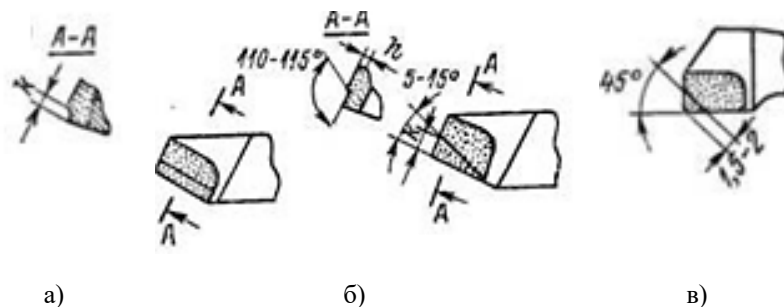


Рис. 3 – Різці з канавками для ламання стружки

Таблиця 2 – Ширина уступу в залежності від глибини різання та подачі

Глибина різання у мм	Ширина уступу у мм при подачі у мм/об					
	0,15-0,30	0,32-0,40	0,45-0,60	0,60-0,70	0,71-0,80	0,81-1,0
0,4-1,4	1,6	2,0	2,4	2,8	3,0-3,2	3,0-3,2
1,5-6,5	1,6-2,5	3,0-3,5	4,0	4,0-4,8	4,8	5,0
7,0-13,0	3,0-3,2	4,0	4,8-5,0	4,8-5,5	4,8-5,6	6,0
14,0-20,0	4,0	4,8-5,0	4,8-5,5	5,6-6,0	5,8-6,4	7,0

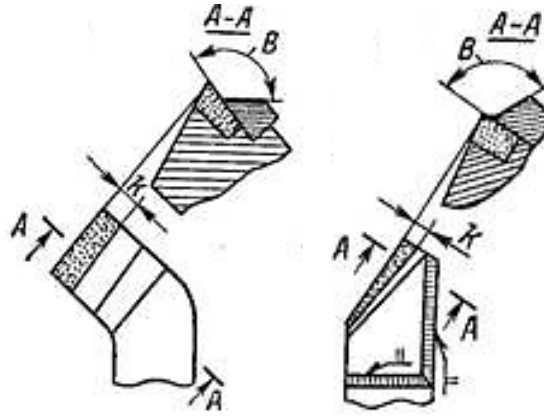
При точінні з глибиною різання менше 2 мм можна застосовувати уступ, показаний на рис. 4.

Необхідність створення уступів різних розмірів при роботі на різних режимах різання робить цей спосіб придатним лише при обробці деталей дуже великими партіями.

Більш широке застосування знаходять напайні або приварені стружколоми (порожки) у вигляді пластинок напаяних (рис. 4, а) або приварених (рис. 4, б) до різця на відстані від ріжучої кромки. Ця відстань за деякими даними коливається в межах 4-8 мм і вибирається залежно від подачі та глибини різання. Кут також залежить від подачі і приймається в межах 105-115°. Чим менше подача, тим менше має бути цей кут.

Матеріал пластинки для ламання стружки - сталь марок 5ХНМ, 40Х, У10, будь-яка сталь, наплавлена сормайтотом, або твердий сплав ВК8.

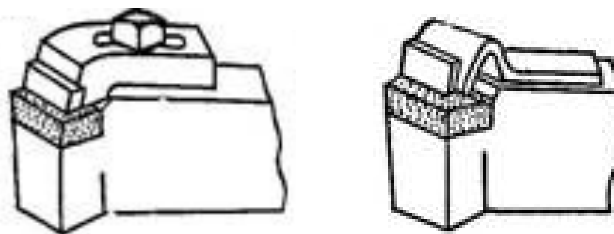
Ці стружколоми мають в основному ті ж недоліки, що і стружколомаючі уступи.



а) б)  
Рис. 4 – Напаяний і наварний стружколамачі

Стружколомник, що закріплюється на різці, показаний на (рис. 5, а), а накладний (пружинний) - на (рис. 5, б). Закріплення накладного стружколомника здійснюється одночасно із закріпленням різця.

Можливість регулювання положення таких стружколомачей з урахуванням режиму різання та властивостей оброблюваного матеріалу, а також у міру зношування різця повідомляє їм деяку універсальність. Робоча поверхня стружколомачі має бути зносостійкою за рахунок привареної або напаяної пластинки. Необхідно, щоб між стружколомачем і передньою поверхнею різця не було щілини, наявність якої призводить до загальмовування та завивання навколо різця, різцетримача, що створює небезпеку для робітника. Імовірність такої щілини особливо велика при похилому стружколомачу.



а) б)  
Рис. 4 – Накладні стружколомачі

#### Висновки.

У ході аналізу фізичних явищ при швидкісному точенні було отримано результати, що корелюють із сучасними науковими даними:

*Енергетика процесу та деформація:* Встановлено, що підвищення швидкості призводить до переходу механічної енергії деформації в теплову з її подальшою локалізацією у зоні зсуву. Це підтверджує результати моделювання високопродуктивного різання Криворучка Д. В. та Залози В. О. [9], згідно з якими зменшення усадки стружки є ключовим індикатором зниження питомих сил різання.

*Термомеханічна стабільність:* Доведено, що при швидкісному точенні виникає ефект «термомеханічного поєднання», який детально описано у роботах Duan Z. & Li C. [1]. Згідно з нашими даними, різальна кромка зазнає інтенсивного нагрівання не через тривалий контакт, а через критичну частоту контактів із частинками металу, що вимагає високої термостійкості матеріалу [7].

*Оптимізація режимів:* Шляхом аналізу теплорозподілу, за методикою схожою до підходів Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. [4], встановлено, що існує «золота середина» швидкості, за якої сумарний знос мінімізується завдяки оптимальному балансу між продуктивністю та температурою в корпусі

різця.

*Ефективність захисних шарів:* Отримано дані про те, що багатошарові наноструктуровані покриття підвищують термодинамічну стабільність кромки [10]. Це узгоджується з дослідженнями Kandevoi M. & Zadorozhnaya E. [2], які довели перевагу PVD-покриттів у запобіганні дифузійному зносу при температурах понад 800°C.

*Прогнозування стійкості:* Використання математичних моделей, розроблених на базі алгоритмів Петракова Ю. В. [6], дозволило встановити, що автоматизація контролю зносу в системах ЧПК при ВШО є критичною через високу швидкість деградації пластини у фінальній фазі роботи [8].

У ході дослідження встановлено, що перехід до швидкісного різання кардинально змінює теплоенергетичну картину процесу обробки.

Основними результатами є:

1. Зміна характеру деформації: Експериментально підтверджено, що при збільшенні швидкості різання ступінь пластичної деформації металу зменшується (усадка стружки знижується на 15–25%). Це призводить до локалізації тепла переважно в зоні зсуву, а не в тілі деталі.

2. Часовий фактор теплопередачі: Доведено, що скорочення часу контакту кожної частинки стружки з передньою поверхнею різця суттєво обмежує частку тепла, яка встигає перейти в інструмент від одиничного об'єму матеріалу. Проте встановлено, що сумарна теплова потужність зростає за рахунок збільшення кількості таких контактів за одиницю часу.

3. Ефективність інструментальних матеріалів: Аналіз показав, що підвищення стійкості досягається за рахунок застосування твердих сплавів із багатошаровими покриттями (зокрема  $Al_2O_3$  та  $TiAlN$ ). Такі покриття виконують роль термічного бар'єру, що дозволяє знизити температуру в тілі самої пластини на 150–200°C при незмінно високій температурі стружки.

4. Швидкісне точіння є ефективним методом підвищення продуктивності, що забезпечує сприятливий розподіл теплових потоків, за якого деталь залишається практично холодною, а основна теплова енергія виноситься зі стружкою.

5. Основним лімітуючим фактором стійкості інструменту при високих швидкостях є інтенсивне акумулювання тепла в різальній кромці, що провокує дифузійний знос та пластичну деформацію.

6. Оптимізація стійкості твердосплавних різців при переході до високих швидкостей має бути комплексною: поєднання дрібнозернистої структури сплаву (для механічної міцності) та багатошарових бар'єрних покриттів (для термічного захисту).

Практичне застосування отриманих результатів дозволяє збільшити період стійкості інструменту на 30–40% при одночасному скороченні основного технологічного часу обробки

### Список літератури

1. Duan, Z., & Li, C. (2021). Thermal-mechanical coupling mechanism and tool wear evolution in high-speed dry turning of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7), 2341–2357. [https://www.researchgate.net/publication/320289334\\_Wear\\_mechanisms\\_of\\_coated\\_tools\\_in\\_high-speed\\_hard\\_turning\\_of\\_high\\_strength\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/320289334_Wear_mechanisms_of_coated_tools_in_high-speed_hard_turning_of_high_strength_steel)
2. Kandevoi, M., & Zadorozhnaya, E. (2022). Wear resistance and life of carbide cutting tools with nanostructured PVD coatings in high-speed machining. *Tribology in Industry*, 44(2), 215–224. [https://www.researchgate.net/publication/372695914\\_Tribological\\_Properties\\_of\\_Innovative\\_Composite\\_Nanostructured\\_Coatings\\_for\\_High-Speed\\_Turning](https://www.researchgate.net/publication/372695914_Tribological_Properties_of_Innovative_Composite_Nanostructured_Coatings_for_High-Speed_Turning)
3. Liu, Z., & Liu, X. (2024). Investigation of specific cutting energy reduction and wear resistance in thermal dry cutting with coated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(4), 215–230. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544089251333013>
4. Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. (2021). Recent advances in material removal mechanism and surface integrity of high speed machining of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 166, 103738. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695521000535>
5. Mane, P. (2025). Predictive Modeling of Surface Roughness, Tool Wear, and Cutting Temperature in High-Speed Turning under Sustainable Machining Environments. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 19(1). [https://www.researchgate.net/publication/392443857\\_Predictive\\_Modeling\\_of\\_Surface\\_Roughness\\_Tool\\_Wear\\_and\\_Cutting\\_Temperature\\_in\\_High-Speed\\_Turning\\_under\\_Sustainable\\_Machining\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/392443857_Predictive_Modeling_of_Surface_Roughness_Tool_Wear_and_Cutting_Temperature_in_High-Speed_Turning_under_Sustainable_Machining_Environments)
6. Петраков Ю. В., Данченко І. В. Моделювання процесу зношування різального інструменту при високошвидкісному точенні. *Механіка та машинобудування*. 2021. № 1. С. 45–54. [https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu\\_mech\\_mash](https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash)
7. Клименко С. А., Клименко С. А., Бондарев С. В. Термічна стійкість інструментальних матеріалів та їх

- зносостійкість при різанні металів. Надтверді матеріали. 2022. Т. 44, № 3. С. 78–89. <http://jnas.nbuu.gov.ua/uk/source/sm>
8. Гусев В. В., Калафатова Л. П., Полонський Л. Г. Оптимізація умов експлуатації твердосплавного інструменту в сучасних технологічних системах. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2023. № 1 (61). С. 12–19. <http://www.dgma.donetsk.ua/nauchno-tehnicheskie-sborniki.html>
9. Криворучко Д. В., Залога В. О. Моделювання процесів високопродуктивного різання : монографія. Суми: Сумський державний університет, 2020. 256 с. <https://essuir.sumdu.edu.ua/search?f.itemtype=Monograph,equal&spc.page=1&query>
10. Мельничук П. П., Виговський П. М. Вплив багатошарових покриттів на термодинамічну стабільність різальної кромки при швидкісній обробці. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. 2024. Вип. 35. С. 22–31. <https://pmo.ztu.edu.ua/>
11. Новіков Ф. В. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с. <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/8791/5/Новиков%20Ф.В..pdf>
12. Гусев В. В., Калафатова Л. П., Полонський Л. Г. Оптимізація умов експлуатації твердосплавного інструменту в сучасних технологічних системах. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2023. № 1 (61). С. 12–19. [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/texts.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/texts.html)
13. Експериментальне визначення контактних характеристик твердого точіння / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2023. № 2 (8). С. 15–23. <https://tm.khpi.edu.ua/issue/view/17067>

#### References (transliterated):

- Duan, Z., & Li, C. (2021). Thermal-mechanical coupling mechanism and tool wear evolution in high-speed dry turning of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7), 2341–2357. [https://www.researchgate.net/publication/320289334\\_Wear\\_mechanisms\\_of\\_coated\\_tools\\_in\\_high-speed\\_hard\\_turning\\_of\\_high\\_strength\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/320289334_Wear_mechanisms_of_coated_tools_in_high-speed_hard_turning_of_high_strength_steel)
- Kandeva, M., & Zadorozhnaya, E. (2022). Wear resistance and life of carbide cutting tools with nanostructured PVD coatings in high-speed machining. *Tribology in Industry*, 44(2), 215–224. [https://www.researchgate.net/publication/372695914\\_Tribological\\_Properties\\_of\\_Innovative\\_Composite\\_Nanostructured\\_Coatings\\_for\\_High-Speed\\_Turning](https://www.researchgate.net/publication/372695914_Tribological_Properties_of_Innovative_Composite_Nanostructured_Coatings_for_High-Speed_Turning)
- Liu, Z., & Liu, X. (2024). Investigation of specific cutting energy reduction and wear resistance in thermal dry cutting with coated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(4), 215–230. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544089251333013>
- Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. (2021). Recent advances in material removal mechanism and surface integrity of high speed machining of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 166, 103738. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695521000535>
- Mane, P. (2025). Predictive Modeling of Surface Roughness, Tool Wear, and Cutting Temperature in High-Speed Turning under Sustainable Machining Environments. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 19(1). [https://www.researchgate.net/publication/392443857\\_Predictive\\_Modeling\\_of\\_Surface\\_Roughness\\_Tool\\_Wear\\_and\\_Cutting\\_Temperature\\_in\\_High-Speed\\_Turning\\_under\\_Sustainable\\_Machining\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/392443857_Predictive_Modeling_of_Surface_Roughness_Tool_Wear_and_Cutting_Temperature_in_High-Speed_Turning_under_Sustainable_Machining_Environments)
- Petrakov Y. V., Danchenko I. V. Modeling the process of cutting tool wear in high-speed turning. *Mechanics and Machine Building*. 2021. No. 1. P. 45–54. [https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu\\_mech\\_mash](https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash)
- Klymenko S. A., Klymenko S. A., Bondarev S. V. Thermal stability of tool materials and their wear resistance when cutting metals. *Superhard materials*. 2022. Vol. 44, No. 3. P. 78–89. <http://jnas.nbuu.gov.ua/uk/source/sm>
- Gusev V. V., Kalafatova L. P., Polonsky L. G. Optimization of operating conditions of carbide tools in modern technological systems. *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*. 2023. No. 1 (61). P. 12–19. <http://www.dgma.donetsk.ua/nauchno-tehnicheskie-sborniki.html>
- Kryvoruchko D. V., Zaloga V. O. Modeling of high-performance cutting processes: monograph. Sumy: Sumy State University, 2020. 256 p. <https://essuir.sumdu.edu.ua/search?f.itemtype=Monograph,equal&spc.page=1&query>
- Melnychuk P. P., Vyhovskiy P. M. The influence of multilayer coatings on the thermodynamic stability of the cutting edge during high-speed machining. *Machining processes, machine tools and tools*. 2024. Issue 35. P. 22–31. <https://pmo.ztu.edu.ua/>
- Novikov F. V. Mathematical modeling and optimization of metalworking processes: monograph / F. V. Novikov. – Kh.: Publishing House of KhNEU named after S. Kuznets, 2014. – 384 p. <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/8791/5/Новиков%20Ф.В..pdf>
- Gusev V. V., Kalafatova L. P., Polonsky L. G. Optimization of operating conditions of carbide tools in modern

technological systems. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy. 2023. No. 1 (61). P. 12–19. [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/texts.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/texts.html)

13. Experimental determination of contact characteristics of hard turning / A. S. Manokhin, Yu. O. Melniychuk, S. A. Klymenko and others. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering. 2023. No. 2 (8). P. 15–23. <https://tm.khpi.edu.ua/issue/view/17067>

Надійшла (received) 03.01.26

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Кондратюк Олег Леонідович (Konratyuk Oleg)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (050) 977-95-67; e-mail: [o.l.condratiuk@karazin.ua](mailto:o.l.condratiuk@karazin.ua); ORCID: 0000-0002-3263-0483

**Скоркін Антон Олегович (Skorkin Anton)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (093) 464-62-39; e-mail: [a.o.skorkin@karazin.ua](mailto:a.o.skorkin@karazin.ua); ORCID: 0000-0003-3032-8341

**Скоркіна Валентина Олександрівна (Skorkyna Valentina)** – асистент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (050) 219-51-01; e-mail: [v.o.skorkina@karazin.ua](mailto:v.o.skorkina@karazin.ua); ORCID: 0009-0004-0411-1047

**Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E\_mail [gorbulic@ukr.net](mailto:gorbulic@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>

**МАТЮШЕНКО М. В., РУДНЄВ О. В., ГАСАНОВ М. І., КЛОЧКО О. О.**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФОВАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТВЕРДИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Розроблено математичну модель для аналізу результатів досліджень алмазного шліфування важкооброблюваного матеріалу, що використовуються при виготовленні та ремонті авіаційної техніки: жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11N23T3MP. Шліфування проводилося з використанням твердих змащувальних матеріалів. Отримані результати дозволяють стверджувати, що тверді змащувальні матеріали здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленням їх складу.

**Ключові слова:** математична модель, алмазне шліфування, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь.

**MATIUSHENKO M., RUDNEV A., GASANOV M., KLOCHKO O.**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE SURFACE GEOMETRY OF HEAVY-CUT MATERIALS GRINDING USING SOLID LUBRICANTS**

A mathematical model has been developed to analyze the results of diamond grinding research on a difficult-to-machine material used in the manufacture and repair of aviation equipment: heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel 10X11N23T3MR. Grinding was carried out using solid lubricants. The results obtained allow us to state that solid lubricants are capable of effectively reducing friction work. Stearic acid should be considered the basis for the creation of TZM with further improvement of their composition.

**Keywords:** mathematical model, diamond grinding, hard lubricating materials, hard-to-machine materials, heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel.

**Вихідні експериментальні дані та їх підготовка**

Експериментальні дані, використані в даній роботі, отримані в результаті дослідження процесу механічної обробки – алмазно-іскрового шліфування важкооброблюваного матеріалу жароміцної корозійностійкої сталі 10X11N23T3MP з використанням різних твердих мастильних матеріалів. Методика проведення експерименту, параметри оброблювального інструмента та вимірювальне обладнання регламентуються експериментальним протоколом.

У ході експерименту досліджувався вплив сукупності технологічних параметрів на значення параметра шорсткості обробленої поверхні  $Ra$ . Як фактори розглядалися:

- тип мастильного матеріалу;
- глибина різання  $S_{\text{пор}}$ ;
- швидкість обробки  $V$ .

У дослідженні використовувалися чотири різні мастильні матеріали:

- стеарин (*Stearin 100%*);
- композиція стеарину з нітридом бору (*80% Stearin + 20% BN*);
- композиція стеарину з дисульфідом молібдену (*65% Stearin + 35% MoS<sub>2</sub>*);
- композиція стеарину з колокольною бронзою (*90% Stearin + 10% кол. бр.*).

Глибина різання  $S_{\text{пор}}$  приймала три фіксовані значення (мм/дв.х):

$$S_{\text{пор}} \in \{0,005; 0,010; 0,015\}.$$

Швидкість обробки  $V$  задавалася у п'яти режимах (м/с):

$$V \in \{25, 36, 50, 63, 78\}.$$

Зазначені значення швидкості різання безпосередньо пов'язані з частотою обертання інструмента, тому величини  $V$  та відповідні значення частоти в подальшому розглядаються як взаємно залежні параметри кінематичного режиму обробки.

Для кожної комбінації значень факторів: тип мастильного матеріалу,  $S_{\text{пор}}$ ,  $V$  (Див. табл.1 – 4) проводилася серія повторних вимірювань параметра шорсткості поверхні  $Ra$ . Отримані значення утворювали скінченну множину результатів, що відповідає одній фіксованій комбінації режимів обробки.

З метою зменшення впливу випадкових похибок вимірювання та отримання узагальненої характеристики якості поверхні, для кожної комбінації факторів використовувалося середнє арифметичне значення параметра  $Ra$ , обчислене за результатами відповідної серії вимірювань. Таким чином, експериментальні дані були зведені до таблиці середніх значень вигляду

$$Ra = Ra(\text{тип мастильного матеріалу}, S_{\text{пор}}, V),$$

яка містить по одному усередненому значенню параметра шорсткості для кожної комбінації досліджуваних факторів.

Таблиця 1 – Експериментальні значення параметра шорсткості  $Ra$  для мастильного матеріалу Stearin\_100 для кожної комбінації  $S_{пор}$  і швидкості  $V$ 

$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$
0.005	25	0.324000	0.005	50	0.313333	0.005	78	0.245000
0.010	25	0.300000	0.010	50	0.371429	0.010	78	0.270000
0.015	25	0.290000	0.015	50	0.352000	0.015	78	0.397143
0.005	39	0.513333	0.005	63	0.240000			
0.010	39	0.345000	0.010	63	0.350000			
0.015	39	0.456667	0.015	63	0.280000			

Таблиця 2 – Експериментальні значення параметра шорсткості  $Ra$  для мастильного матеріалу BN 80 20

$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$
0.005	25	0.326667	0.005	50	0.226667	0.005	78	1.157500
0.010	25	0.297143	0.010	50	0.544444	0.010	78	0.224000
0.015	25	0.336667	0.015	50	0.462500	0.015	78	0.340000
0.005	39	0.286667	0.005	63	0.805714			
0.010	39	0.296667	0.010	63	0.416000			
0.015	39	0.356000	0.015	63	0.443333			

Таблиця 3 – Експериментальні значення параметра шорсткості  $Ra$  для мастильного матеріалу MoS<sub>2</sub>\_65\_35

$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$
0.005	25	0.320000	0.005	50	0.240000	0.005	78	0.273333
0.010	25	0.536000	0.010	50	0.430000	0.010	78	0.474286
0.015	25	0.374286	0.015	50	0.343333	0.015	78	0.216667
0.005	39	0.340000	0.005	63	0.342857			
0.010	39	0.255000	0.010	63	0.320000			
0.015	39	0.280000	0.015	63	0.280000			

Таблиця 4 – Експериментальні значення параметра шорсткості  $Ra$  для мастильного матеріалу Kol br 90 10

$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$	$S_{пор}$	$V$	Середнє $Ra$
0.005	25	0.364000	0.005	50	0.308571	0.005	78	0.367500
0.010	25	0.345000	0.010	50	0.584000	0.010	78	0.553333
0.015	25	0.457143	0.015	50	0.343333	0.015	78	0.454286
0.005	39	0.333333	0.005	63	0.362857			
0.010	39	0.445000	0.010	63	0.456250			
0.015	39	0.570000	0.015	63	0.410000			

### Загальна постановка задачі аналізу експериментальних даних

При аналізі експериментальних результатів важливим є вибір коректної математичної моделі, яка відповідає структурі наявних даних та поставленій меті дослідження. У даній роботі експериментальні дані мають дискретний характер, оскільки всі керовані параметри процесу приймають скінченну кількість фіксованих значень, заданих експериментальним планом.

Зокрема, кожен з досліджуваних факторів приймає значення з наперед визначеної скінченної множини, а експериментальна вибірка утворює повну факторну сітку за цими значеннями. За таких умов відсутнє природне підґрунтя для побудови неперервної функціональної залежності між параметром відгуку та факторами, оскільки:

- значення факторів не утворюють неперервного діапазону, а задані у вигляді окремих рівнів;
- кількість експериментальних точок є обмеженою і не дозволяє коректно ідентифікувати параметри функціональної моделі без введення додаткових припущень;

- форма можливої залежності між параметрами наперед невідома і не впливає безпосередньо з фізичної моделі процесу.

У зв'язку з цим використання класичних методів апроксимації або регресійного аналізу може призводити до надмірної інтерпретації експериментальних даних та появи артефактів, зумовлених вибором конкретної функціональної форми. Такий підхід є особливо некоректним у випадках, коли метою дослідження є не прогнозування значення параметра відгуку, а порівняльна оцінка впливу окремих факторів або їх рівнів.

З огляду на зазначене, у даній роботі експериментальні дані розглядаються як сукупність дискретних спостережень, а аналіз залежності параметра відгуку від факторів здійснюється не шляхом побудови неперервних функцій, а на основі порівняльного аналізу значень параметра відгуку між рівнями факторів при фіксованих значеннях інших параметрів.

За умов дискретного характеру експериментальних даних та обмеженої кількості рівнів досліджуваних факторів доцільним є перехід від аналізу абсолютних значень параметра відгуку до аналізу відносних відмінностей між ними. Такий підхід дозволяє безпосередньо порівнювати вплив окремих рівнів одного фактора за фіксованих значень інших параметрів, не вводячи додаткових припущень щодо форми функціональної залежності.

Параметр шорсткості поверхні, заданий як  $Ra$ , виміряний для двох різних рівнів одного і того ж фактора за однакових значень решти факторів. У цьому випадку природною мірою порівняння є відношення відповідних значень параметра шорсткості. Для кожної фіксованої комбінації інших параметрів вводиться безрозмірна величина

$$K_{ij} = \frac{Ra_i}{Ra_j} \quad (1)$$

де  $Ra_i$  та  $Ra_j$  відповідають значенням параметра шорсткості для двох різних рівнів аналізованого фактора.

Значення величини  $K_{ij}$  безпосередньо відображає напрям порівняльного впливу рівнів фактора: при  $K_{ij} < 1$  рівень  $i$  забезпечує менше значення параметра шорсткості порівняно з рівнем  $j$ , тоді як при  $K_{ij} > 1$  має місце протилежна ситуація. Таким чином, відношення  $K_{ij}$  дозволяє формалізувати порівняльну оцінку якості обробки у вигляді числового критерію, інваріантного до вибору одиниць вимірювання параметра  $Ra$ .

Оскільки кожна пара рівнів фактора порівнюється не в одному фіксованому режимі, а в сукупності різних комбінацій інших параметрів, для однієї і тієї ж пари рівнів виникає множина значень величини  $K_{ij}$ , що відповідає різним умовам обробки. За таких обставин аналіз окремих значень  $K_{ij}$  не дозволяє зробити узагальнену оцінку впливу фактора в цілому.

Для отримання загальної характеристики порівняльного впливу рівнів фактора доцільним є агрегування значень відношень  $K_{ij}$  за всіма фіксованими комбінаціями інших параметрів. Враховуючи мультиплікативний характер відношень, таке агрегування здійснюється шляхом переходу до логарифмічної шкали, що дозволяє звести добуток відношень до суми відповідних логарифмів.

Такий підхід узгоджується з сучасними результатами теорії вимірювань та математичної статистики для шкал відношень, відповідно до яких коректне агрегування відносних показників повинно зберігати інваріантність до масштабування та відображати мультиплікативну природу вихідних даних. У цьому випадку логарифмічне перетворення є математично обґрунтованим засобом переходу до адитивної форми, що забезпечує коректну агрегацію результатів за різними умовами спостереження та дозволяє отримати узагальнену характеристику порівняльного впливу рівнів фактора без введення додаткових апріорних припущень.

У результаті для кожної пари рівнів фактора вводиться узагальнена величина

$$S_{ij} = \sum_c \log \frac{Ra_i^{(c)}}{Ra_j^{(c)}} \quad (2)$$

де сумування виконується за всіма можливими комбінаціями фіксованих значень інших факторів, а  $Ra_i^{(c)}$  та  $Ra_j^{(c)}$  — значення параметра шорсткості, отримані в умовах  $c$ .

Знак величини  $S_{ij}$  визначає напрям типового відхилення значень параметра шорсткості між рівнями фактора в сукупності режимів обробки, тоді як її модуль характеризує ступінь стійкості цього відхилення при зміні умов експерименту. Такий підхід дозволяє перейти від аналізу окремих режимів до узагальненої порівняльної оцінки впливу рівнів фактора на параметр шорсткості поверхні.

### Аналіз результатів

У результаті застосування логарифмічної агрегації попарних відношень параметра шорсткості було отримано узагальнені матриці часткової домінації для кожного з досліджуваних факторів. У наведених таблицях елемент матриці  $S_{ij}$  визначається як описано в рівнянні 2. Сумування виконується за всіма фіксованими комбінаціями інших параметрів процесу обробки. Таким чином, кожна таблиця відображає інтегральний результат порівняння рівнів фактора за всією множиною експериментальних режимів.

Таблиця 5 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора «тип мастильного матеріалу»

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	0.000000	-0.934368	2.742464	2.550926
Kol_br_90_10	0.934368	0.000000	3.676832	3.485294
MoS <sub>2</sub> _65_35	-2.742464	-3.676832	0.000000	-0.191538
Stearin_100	-2.550926	-3.485294	0.191538	0.000000

Таблиця 6 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора глибини різання  $S_{\text{пор}}$

	0.005	0.01	0.015
0.005	0.000000	-1.487582	-0.754157
0.01	1.487582	0.000000	0.733425
0.015	0.754157	-0.733425	0.000000

Таблиця 7 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора швидкості обробки  $V$

	25	39	50	63	78
25	0.000000	-0.392311	-0.412002	-0.763902	-0.571033
39	0.392311	0.000000	-0.019690	-0.371591	-0.178722
50	0.412002	0.019690	0.000000	-0.351900	-0.159031
63	0.763902	0.371591	0.351900	0.000000	0.192869
78	0.571033	0.178722	0.159031	-0.192869	0.000000

Наведені матриці відповідають підсумковим логарифмічним сумах попарних порівнянь. Повний набір проміжних матриць відношень  $K_{ij}$ , побудованих для кожної фіксованої комбінації режимів обробки, наведено в табл. 8 - 23. У основному тексті розглядаються лише агреговані результати, що узагальнюють поведінку факторів по всій множині експериментальних умов.

Таблиці порівняння результатів співвідношення за формулою 1 та відповідна таблиця агрегованого результату 2

Таблиця 8 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{\text{пор}} = 0.005$ ,  $V = 25$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.897437	1.020834	1.008231
Kol_br_90_10	1.114285	1.000000	1.137500	1.123457
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.979591	0.879121	1.000000	0.987654
Stearin_100	0.991836	0.890110	1.012500	1.000000

Таблиця 9 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{\text{пор}} = 0.005$ ,  $V = 36$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.860002	0.843138	0.558443
Kol_br_90_10	1.162788	1.000000	0.980391	0.649350
MoS <sub>2</sub> _65_35	1.186045	1.020001	1.000000	0.662338
Stearin_100	1.790694	1.540001	1.509803	1.000000

Таблиця 10 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.005$ ,  $V = 50$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.734570	0.944446	0.723406
Kol_br_90_10	1.361341	1.000000	1.285713	0.984802
MoS <sub>2</sub> _65_35	1.058822	0.777779	1.000000	0.765958
Stearin_100	1.382349	1.015432	1.305554	1.000000

**Таблиці підсумкових результатів, за формулою 2**Таблиця 11 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.005$ ,  $V = 63$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	2.220473	2.350000	3.357142
Kol_br_90_10	0.450355	1.000000	1.058333	1.511904
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.425532	0.944882	1.000000	1.428571
Stearin_100	0.297872	0.661418	0.700000	1.000000

Таблиця 12 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.005$ ,  $V = 78$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	3.149660	4.234761	4.724490
Kol_br_90_10	0.317495	1.000000	1.344514	1.500000
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.236141	0.743763	1.000000	1.115645
Stearin_100	0.211663	0.666667	0.896343	1.000000

Таблиця 13 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.01$ ,  $V = 25$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.861284	0.554371	0.990477
Kol_br_90_10	1.161057	1.000000	0.643657	1.150000
MoS <sub>2</sub> _65_35	1.803845	1.553623	1.000000	1.786667
Stearin_100	1.009615	0.869565	0.559701	1.000000

Таблиця 14 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.01$ ,  $V = 36$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.666667	1.163400	0.859904
Kol_br_90_10	1.499998	1.000000	1.745098	1.289855
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.859550	0.573034	1.000000	0.739130
Stearin_100	1.162920	0.775281	1.352941	1.000000

Таблиця 15 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.01$ ,  $V = 50$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.932267	1.266149	1.465809
Kol_br_90_10	1.072654	1.000000	1.358140	1.572306
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.789797	0.736301	1.000000	1.157691
Stearin_100	0.682217	0.636009	0.863788	1.000000

Таблиця 16 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.01$ ,  $V = 78$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.911781	1.300000	1.188571
Kol_br_90_10	1.096755	1.000000	1.425781	1.303571
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.769231	0.701370	1.000000	0.914286
Stearin_100	0.841346	0.767123	1.093750	1.000000

Таблиця 17 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.01$ ,  $V = 78$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.404820	0.472289	0.829630
Kol_br_90_10	2.470237	1.000000	1.166665	2.049381
MoS <sub>2</sub> _65_35	2.117348	0.857144	1.000000	1.756615
Stearin_100	1.205357	0.487952	0.569277	1.000000

Таблиця 18 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.015$ ,  $V = 25$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.736459	0.899491	1.160921
Kol_br_90_10	1.357849	1.000000	1.221373	1.576355
MoS <sub>2</sub> _65_35	1.111739	0.818750	1.000000	1.290641
Stearin_100	0.861385	0.634375	0.774809	1.000000

Таблиця 19 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.015$ ,  $V = 36$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.624561	1.271429	0.779561
Kol_br_90_10	1.601124	1.000000	2.035714	1.248174
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.786517	0.491228	1.000000	0.613138
Stearin_100	1.282772	0.801170	1.630954	1.000000

Таблиця 20 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.015$ ,  $V = 50$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	1.347089	1.347089	1.313920
Kol_br_90_10	0.742342	1.000000	1.000000	0.975378
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.742342	1.000000	1.000000	0.975378
Stearin_100	0.761081	1.025244	1.025244	1.000000

Таблиця 21 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{pop} = 0.015$ ,  $V = 78$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	1.081300	1.583332	1.583332
Kol_br_90_10	0.924813	1.000000	1.464286	1.464286
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.631579	0.682927	1.000000	1.000000
Stearin_100	0.631579	0.682927	1.000000	1.000000

Таблиця 22 – Матриця відношень  $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$  для factor = lubricant; фіксовано  $S_{\text{пор}} = 0.015$ ,  $V = 78$ 

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.748427	1.569228	0.856115
Kol_br_90_10	1.336135	1.000000	2.096701	1.143885
MoS <sub>2</sub> _65_35	0.637256	0.476940	1.000000	0.545564
Stearin_100	1.168068	0.874214	1.832965	1.000000

Таблиця 23 – Підсумкова таблиця часткової домінації для factor = lubricant: агрегування через логарифмічну суму за всіма 15 контекстами

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS <sub>2</sub> _65_35	Stearin_100
BN_80_20	0.000000	-0.934368	2.742464	2.550926
Kol_br_90_10	0.934368	0.000000	3.676832	3.485294
MoS <sub>2</sub> _65_35	-2.742464	-3.676832	0.000000	-0.191538
Stearin_100	-2.550926	-3.485294	0.191538	0.000000

Аналіз отриманих матриць свідчить про відсутність повної домінації будь-якого рівня факторів. Для жодного з рівнів не виконується умова сталого переважання над усіма іншими рівнями у всіх напрямках порівняння, що є характерним для експериментальних даних, отриманих у різних режимах обробки. У межах прийнятої моделі знак елемента матриці  $S_{ij}$  має чітку інтерпретацію: від'ємне значення означає, що рівень  $i$  у сукупності режимів забезпечує менше значення параметра шорсткості порівняно з рівнем  $j$ , тоді як додатне значення вказує на протилежний ефект. Таким чином, рівень фактора, для якого відповідний рядок матриці містить переважно від'ємні значення, демонструє кращі результати порівняно з іншими рівнями, тоді як переважання додатних значень свідчить про гірші показники шорсткості.

Водночас порівняння абсолютних величин додатних та від'ємних елементів між собою не є доцільним, оскільки модулі значень  $S_{ij}$  залежать від кількості та розподілу режимів, у яких проявляється перевага або недолік відповідного рівня фактора. З огляду на це, зведення кількох числових значень до єдиної скалярної метрики ефективності може призводити до втрати змістовної інтерпретації.

Таким чином, у межах даного підходу аналіз часткової домінації базується на знаковій структурі агрегованих матриць, що дозволяє встановити напрями відносної переваги між рівнями факторів без введення додаткових припущень щодо кількісної шкали ефективності.

#### Аналіз впливу типу мастильного матеріалу

Знакова структура матриці дозволяє виявити відносні тенденції. Зокрема, для мастильних матеріалів на основі MoS<sub>2</sub> та чистого стеарину спостерігається переважання від'ємних значень у відповідних рядках при порівнянні з композиціями BN\_80\_20 та Kol\_br\_90\_10, що вказує на типову перевагу цих матеріалів за показником шорсткості в сукупності режимів обробки. Водночас композиції BN\_80\_20 та Kol\_br\_90\_10 характеризуються переважанням додатних значень при попарних порівняннях, що свідчить про менш сприятливі результати в середньому по експериментальній сітці.

#### Аналіз впливу швидкості обробки

Водночас можна відзначити, що нижчі значення швидкості (зокрема  $V = 25$  м/с) характеризуються переважанням від'ємних елементів у відповідному рядку матриці при порівнянні з більшістю вищих швидкостей, що вказує на тенденцію до зменшення шорсткості поверхні за нижчих швидкісних режимів. Навпаки, для вищих значень швидкості ( $V = 63$  м/с та  $V = 78$  м/с) спостерігається зростання кількості додатних значень у попарних порівняннях, що свідчить про погіршення якості поверхні у середньому по всіх розглянутих режимах.

#### Аналіз впливу глибини різання

Агрегована матриця часткової домінації для фактора глибини різання  $S_{\text{пор}}$  вказує на чітко виражену нестрогу домінацію окремих рівнів. Зокрема, для глибини  $S_{\text{пор}} = 0,005$  мм/дв.х спостерігається переважання від'ємних значень у попарних порівняннях з іншими рівнями, що свідчить про типову перевагу меншої глибини різання з точки зору зменшення параметра шорсткості.

Для найбільшого значення глибини  $S_{\text{пор}} = 0,015$  мм/дв.х, навпаки, характерним є переважання додатних значень у відповідних елементах матриці, що вказує на погіршення якості поверхні при збільшенні глибини різання. Проміжне значення  $S_{\text{пор}} = 0,01$  мм/дв.х займає перехідне положення, не демонструючи однозначної переваги або недоліку відносно інших рівнів у всій сукупності режимів.

## Список літератури:

1. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. 2nd ed. O'Reilly Media, 2017. ISBN 978–1491957660.
2. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer, 2004. ISBN 978–0387402727.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Wiley, 2019. ISBN 978–1119492443.
4. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning. 2nd ed. Springer, 2021. ISBN 978–1071614174.
5. Оцінка ефективності застосування твердих змащувальних матеріалів при алмазному шліфуванні труднообробних сплавів і сталів / Степанов М.С., Гасанов М.И., Руднев А.В., Котляр О.В., Титаренко О.В., Иванова М.С. Баранов В.М. // 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», 2024. № 2(10),2024. – С. 3–8. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).01 <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a7341a28-bf2b-4045-9cf4-7fb6628d7d21>
6. Оцінка змащувальної здатності твердих змащувальних матеріалів при алмазному шліфуванні важкооброблюваних матеріалів / Гасанов М.И., Руднев А.В., Котляр О.В., Титаренко О.В., Корчагин І.Г. // 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», 2024. № 1 (9) 2024. – С. 65–70. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/55c7a8dd-57b3-4f0d-831a-ad6f1c754887>
7. Оцінка змащувальної здатності твердих змащувальних матеріалів при шліфуванні важкооброблюваних жароміцних сталей / Титаренко О.В., Руднев О.В. // Збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення», 2024 р. – С. 373 - 374. <https://nangu.edu.ua/uploads/files/Zbirnyk%20TEZ%2028.03.2024.pdf>
8. Study of the Effect of Solid Lubricant Composition on Surface Roughness of Ground Parts / Rudnev Aleksandr; Stepanov Mykhaylo; Gasanov Magomedimin; Permyakov Alexander; Kotliar Alexey; Ivanova Maryna; Edl Milan // Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1129. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_8) Ciobaotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. ICoRSE 2024.

## Bibliography (transliterated):

1. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. 2nd ed. O'Reilly Media, 2017. ISBN 978–1491957660.
2. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer, 2004. ISBN 978–0387402727.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Wiley, 2019. ISBN 978–1119492443.
4. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning. 2nd ed. Springer, 2021. ISBN 978–1071614174.
5. Otsenka effektivnosti prochnosti tverdykh splavov pri almaznom shlifovanii trudnoobrabotannykh splavov i staley / Stepanov M.S., Gasanov M.I., Rudnev A.V., Kotlyar O.V., Titarenko O.V., Ivanova M.S. Baranov V.M. // Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii = Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnika v mashinostroyenii: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Khar'kov. politekhn. in-t». – Khar'kov : NTU «KHPİ», 2024. № 2(10), 2024. – S. 3–8. – ISSN 2079-004KH, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).01 <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a7341a28-bf2b-4045-9cf4-7fb6628d7d21>
6. Otsenka smachivayemosti tverdykh smachivayushchikh materialov pri almaznom shlifovanii vazhnykh materialov / Gasanov M.I., Rudnev A.V., Kotlyar O.V., Titarenko O.V., Korchagin I.G. // Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii = Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnika v mashinostroyenii: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Khar'kov. politekhn. in-t». – Khar'kov : NTU «KHPİ», 2024. № 1 (9) 2024. – S. 65–70. – ISSN 2079-004KH, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/55c7a8dd-57b3-4f0d-831a-ad6f1c754887>
7. Otsenka smachivayemosti tverdykh smachivayushchikh materialov pri shlifovke sil'noobrabotannykh zharomitskikh staley / Titarenko O.V., Rudnev O.V. // Sbornik tez dopovedey vseukrainskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy skladskoy otrasli bezpeki i obrony Ukrainy v umakh osobykh pravovykh periodov: potochnyy stan i shlyakhi virishenyya», 2024 g. – S. 373 - 374. <https://nangu.edu.ua/uploads/files/Zbirnyk%20TEZ%2028.03.2024.pdf>
8. Study of the Effect of Solid Lubricant Composition on Surface Roughness of Ground Parts / Rudnev Aleksandr; Stepanov Mykhaylo; Gasanov Magomedimin; Permyakov Alexander; Kotliar Alexey; Ivanova Maryna; Edl Milan // Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1129. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_8) Ciobaotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. ICoRSE 2024.

Надійшла (received) 09.03.2026

## Відомості про авторів / About the Authors

**Матюшенко Микола Васильович (Matiushenko Mykola)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Геометричне моделювання та комп'ютерна графіка" Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-64-31; e mail: [Mykola.Matiushenko@kpi.edu.ua](mailto:Mykola.Matiushenko@kpi.edu.ua), ORCID: 0000-0003-4727-8993

**Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin)** – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [kh.hpi.hasanov@gmail.com](mailto:kh.hpi.hasanov@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2161-2386

**Руднев Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф.Семка Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: [aleksandr1827.64@gmail.com](mailto:aleksandr1827.64@gmail.com), ORCID: 0000-0002-4091-6748

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

*МІСАН Б. С., НІКІТІН Д. О.*

## **ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АМОРТИЗУВАЛЬНОГО ВКЛАДИША ДЛЯ НОЖНИХ ПРОТЕЗІВ**

Досліджено метод тестування амортизувального вкладиша для ножних протезів, виготовленого з використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку. Метод базується на ударному імпульсі та аналізі вільних затухаючих коливань, який призначений для кількісної оцінки демпфувальних властивостей вкладиша. Особливу увагу було приділено дослідженню динамічних і в'язкопружних процесів у конструкції амортизованого вкладишу та матеріалу під дією ударних навантажень. Визначено основні параметри вкладишу, які впливають на гасіння вібрації, а саме: жорсткість матеріалу, ступінь і форму внутрішньої перфорації. Запропонований метод та конструкція тестового макету дозволяє порівнювати різні конструктивні варіанти амортизувальних вкладишів та може бути використаний для оптимізації протезних систем з метою зменшення динамічних навантажень і підвищення комфорту користувачів.

**Ключові слова:** метод тестування, ножний протез, амортизувальний вкладиш, 3D-друк, TPU, гасіння вібрації, ударний метод.

**MISAN B., NIKITIN D.**

### **USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE AND TESTING OF SHOCK-ABSORBING INSERTS FOR LEG PROSTHESES**

A method for testing shock-absorbing inserts for leg prostheses manufactured using additive FFF/FDM 3D printing technology was investigated. The method is based on impact pulse and analysis of free damped oscillations, which is designed to quantitatively assess the damping properties of the insert. Particular attention was paid to the study of dynamic and viscoelastic processes in the design of the shock-absorbing insert and material under impact loads. The main parameters of the insert that affect vibration damping were determined, namely: material stiffness, degree and shape of internal perforation. The proposed method and design of the test model allows comparing different design options for shock-absorbing inserts and can be used to optimize prosthetic systems in order to reduce dynamic loads and increase user comfort.

**Keywords:** testing method, foot prosthesis, shock-absorbing insert, 3D printing, TPU, vibration damping, impact method.

**Вступ.** Сучасні розвиток у сфері протезобудування характеризуються зростанням вимог до об'єктивного визначення динамічних навантажень, які виникають від опорної поверхні до користувача протеза. Важливу роль у забезпеченні комфортного використання протеза його безпеки та експлуатаційної надійності відіграє ефективність гасіння ударних і вібраційних навантажень, які виникають у процесі ходьби. Одним з методів для зменшення таких навантажень є застосування амортизувальних вкладишів з в'язкопружних полімерних матеріалів, які виготовляються із використанням технологій адитивного 3D-друку [1-3]. Адитивне виробництво за технологією FFF/FDM, дозволяє створювати вироби з прогнозованою внутрішню структуру та поведінкою при експлуатації, зокрема шляхом зміни ступеня та геометрії перфорації, що відкриває можливості оптимізації демпфувальних властивостей в залежності від особливостей анатомії користувача. Водночас ефективне впровадження таких рішень потребує надійних, відтворюваних та автоматизованих методів контролю та тестування, здатних забезпечити оцінку амортизувальних властивостей виробу. Особливий інтерес у цьому напрямку становить ударний метод тестування зразків, що базується на аналізі вільних затухаючих коливань після імпульсного збудження. Даний підхід дозволяє адекватно відтворювати умови ударного навантаження, близькі до реальних експлуатаційних режимів ножних протезів з можливістю підбору навантаження з урахуванням особливостей анатомії користувача, та досліджувати в'язкопружні й коливальні процеси в матеріалі амортизувального вкладиша [4-7]. Разом із тим, під час розроблення методу тестування амортизувальних вкладишів необхідно розв'язати низку ключових проблем, а саме: забезпечення відтворюваного та об'єктивного збудження динамічних навантажень, що відповідають реальним умовам експлуатації ножних протезів; запобігання виникненню паразитних резонансних явищ у вимірювальному макеті, які можуть спотворювати результати тестування; автоматизація процесу збору та обробки експериментальних даних, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, підвищити точність визначення параметрів демпфування та забезпечити порівнюваність результатів; інтеграція методу тестування в єдину експериментальну систему, яка поєднує механічну частину, вимірювальні датчики та програмні засоби аналізу [8-11]. Таким чином, розробка автоматизованого методу контролю та тестування друкованих амортизувальних вкладишів для ножних протезів з використанням ударного методу – є актуальним науково-прикладним завданням, особливо в Україні під час війни. Спрямованим на підвищення достовірності оцінювання демпфувальних властивостей, оптимізацію конструкції протезних компонентів і покращення комфорту користувачів.

#### **Мета дослідження.**

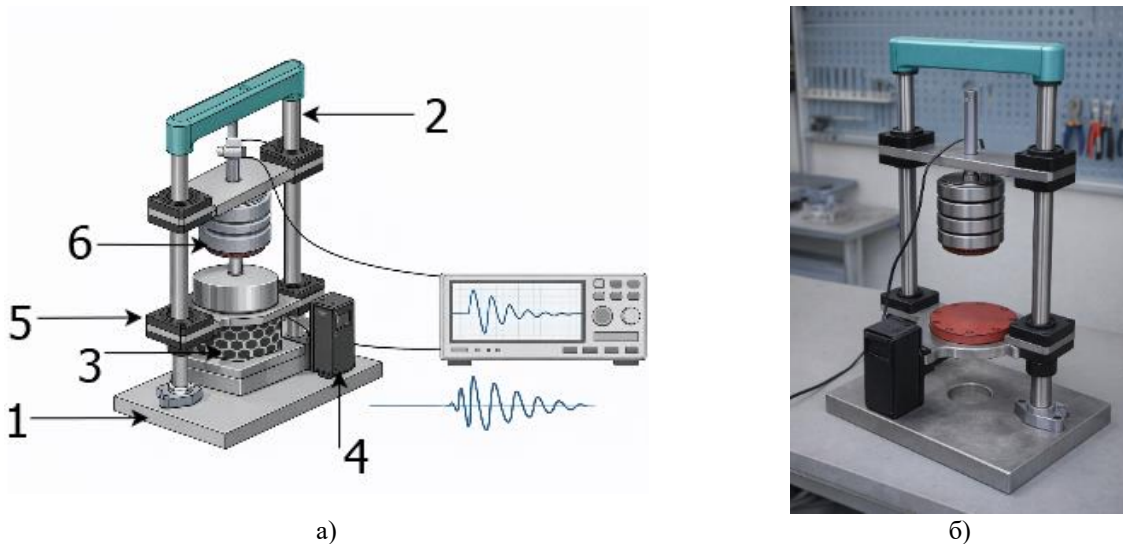
Дослідження спрямовані на розробку та обґрунтування автоматизованого методу тестування амортизувального вкладиша для ножних протезів, виготовленого з використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку, з метою оцінки ефективності гасіння ударних і вібраційних навантажень при експлуатації протеза. Особлива увага приділяється дослідженню конструкції вкладишу з термопластичного поліуретану (TPU) та його реакції під час ударного збудження, а також розробці методики автоматизованого збору та обробки експериментальних даних, яка забезпечує відтворюваність та об'єктивність результатів тестування. Об'єктом дослідження є процес гасіння ударних та вібраційних навантажень у амортизувальних вкладишах ножних протезів за умов динамічного навантаження.

Предметом дослідження є матеріальні та конструктивні параметри амортизувального вкладиша, а також методичні та експериментальні параметри ударного тестування, що описують процес демпфування та визначають ефективність гасіння вібрацій.

**Розробка системи фіксації вібраційних сигналів.**

Для оцінки демпфувальних властивостей амортизувальних вкладишів був використаний ударний метод тестування, який базується на вільних затухаючих коливаннях. Він дозволяє кількісно визначити ефективність гасіння вібрацій за умов імпульсного навантаження. Досліджуваний зразок встановлювався між жорсткою опорною плитою та інерційним навантаженням (молот), утворюючи механічну систему з нерухомою опорою вільною масою яка рухаються перпендикулярно вниз до опори, та прокладкою між ними (тестовий зразок).

Колівальний процес збуджувався короткочасним механічним ударом, після чого система переходила у режим вільних коливань, що затухають з часом. Реєстрація колівальної відповіді здійснювалася за допомогою акселерометра, закріпленого на ударній площадці макету, рис. 1.



а) 1 – основа макету; 2 – напрямна для ударного молота; 3 – тестовий зразок; 4 – блок для датчику акселерометра; 5 – ударна площадка; 6 – ударний молот.  
 б) Розроблений макет за цією схемою

Рис. 1 – Принцип дії макету для ударного тестування зразків (а) та розроблений макет за цією схемою (б)

Отриманий часовий сигнал прискорення використовувався для визначення амплітуд послідовних піків коливань  $x_n$  та  $x_{n+1}$ , які характеризують швидкість затухання колівального процесу у системі.

Відсоток гасіння вібрацій визначався за співвідношенням:

$$D = \left(1 - \frac{x_{n+1}}{x_n}\right) \cdot 100\%. \tag{1}$$

Де:  $x_n$  та  $x_{n+1}$  – амплітуди двох послідовних колівальних циклів.

Зазначений показник характеризує відносне зменшення амплітуди коливань за один період і використовується для порівняльної оцінки демпфувальних властивостей зразків з різними матеріальними та конструктивними параметрами виробу.

Для кількісної оцінки демпфувальних властивостей використовувалися амплітуди двох послідовних колівальних циклів (наприклад  $x_3$  які дорівнює 6,1 та  $x_4$  амплітуда коливань яких дорівнює 4,8), за якими визначався відсоток гасіння вібрацій тестового зразка. Швидше зменшення амплітуди свідчить про вищу ефективність гасіння вібрацій амортизувальним елементом, рис. 2. Таким чином відсоток гасіння вібрації  $D$  буде дорівнювати:

$$D = \left(1 - \frac{x_{n+1}}{x_n}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{4,8}{6,1}\right) \cdot 100\% \approx 21,3. \tag{2}$$

Отримане значення відсотка гасіння  $D \approx 21,3\%$  показує ефективну демпфувальну дію амортизувального вкладиша та вказує на швидке затухання вільних коливань після ударного збудження. Чим більшим є значення  $D$ , тим вищою є здатність матеріалу та його внутрішньої структури поглинати механічну енергію.

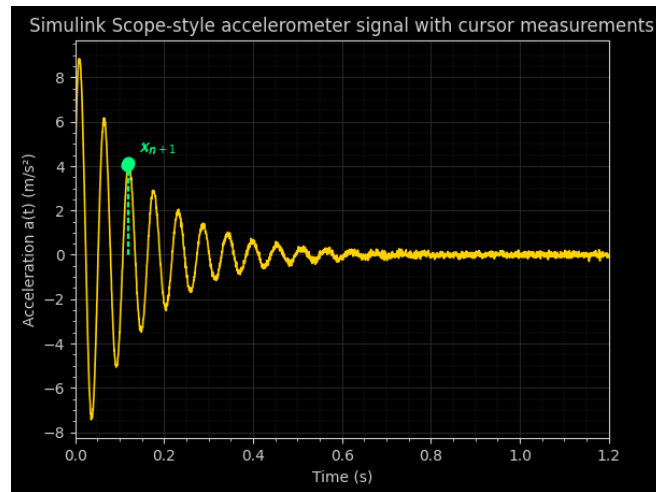


Рис. 2 – Обробка сигналу з акселерометра

Система автоматизованого контроль (САУ) для фільтрації шумів з акселерометру при вимірюванні коливань тестового зразка, складеться з наступних блоків, рис. 3:

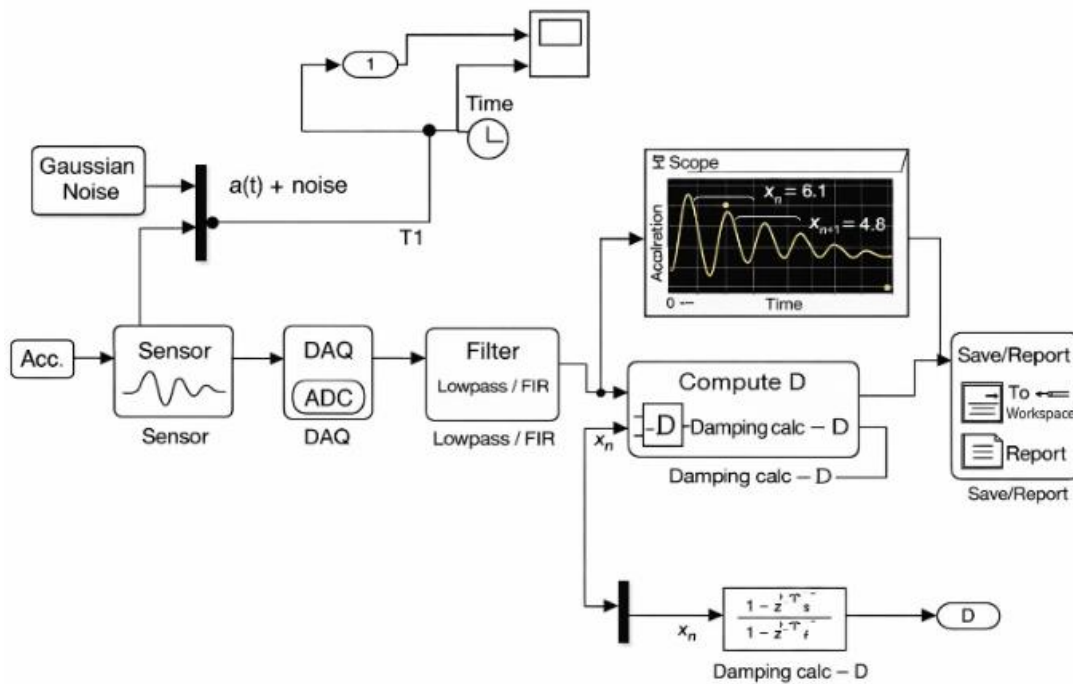


Рис. 3 – Обробка сигналу з акселерометра

Розроблена система автоматизованого контролю забезпечує придушення зовнішніх шумів та виділення інформативної складової сигналу акселерометра, що відповідає вільним затухаючим коливанням після ударного збудження.

На вході системи формується сигнал прискорення  $a(t)$ , до якого додається зовнішній шум (вимірювальний, механічний та електронний), змодельований як адитивний випадковий процес. Отриманий сигнал  $a(t)+n(t)$  надходить на вхід вимірювального тракту.

Загальну передавальну функцію каналу обробки сигналу акселерометра можна подати у вигляді:

$$W_{(s)} = W_s(s) \cdot W_{DAQ}(s) \cdot W_f(s), \quad (3)$$

Де:  $W_s(s)$  – передавальна функція акселерометра,  $W_{DAQ}(s)$  – передавальна функція вимірювального тракту,  $W_f(s)$  – передавальна функція фільтра.

Передавальна функція акселерометра у першому наближенні може бути представлений як аперіодична ланка першого порядку:

$$W_s(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1}, \quad (4)$$

Де:  $K_s$  – коефіцієнт чутливості акселерометра,  $T_s$  – стала часу.

Передавальна функція фільтра для пригнічення шумів у системі використовується низькочастотний фільтр, який у безперервному вигляді можна подати як:

$$W_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1}, \quad (5)$$

Де:  $T_f$  – стала часу фільтра, що визначає граничну частоту зрізу.

Загальна передавальна функція з урахуванням наведених ланок загальна передавальна функція каналу фільтрації має вигляд:

$$W(s) = \frac{K_s}{(T_s s + 1)(T_f s + 1)}. \quad (6)$$

Дана передавальна функція забезпечує згладжування шумових складових сигналу прискорення акселерометра та збереження основної низькочастотної динаміки, необхідної для коректного визначення параметрів затухання коливань тестового зразка.

Для кожної комбінації параметрів дослідження вимірювання проводилися не менше трьох разів, після чого обчислювалося середнє значення відсотка гасіння вібрацій, що дозволяло зменшити вплив випадкових похибок та підвищити достовірність результатів.

Змінюючи вагу та висоту удару молоту, можливо змінювати навантаження на тестовий зразок, тим самим відварювати необхідні параметри вібрації, які виникають при житті діяльності людини та враховуючи її фізіологічні особливості (такі як вага людини, зріст, розмір ступні, і.т.д.).

#### Проведення досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень демпфувальних властивостей були виготовлені тестові зразки амортизувальних вкладишів, призначені для застосування у ножних протезах. Зразки виготовлялися з термопластичного поліуретану (TPU) із використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку, що забезпечує відтворюваність геометрії та можливість керування внутрішньою структурою виробів.

У дослідженні використовувався TPU з різними значеннями твердості за шкалою Шора А, а саме:

- 50А, еластомер з підвищеною твердістю, що відзначається меншою деформівністю та зниженими внутрішніми втратами енергії;
- 80А, еластомер середньої твердості з компромісним співвідношенням жорсткості та демпфувальних властивостей;
- 90А, еластомер з низькою твердістю, що характеризується підвищеною деформівністю та значними в'язкопружними втратами енергії.

Для зручності проведення експерименту зразки різної твердості будуть надруковані різним кліром рис. 4:



а) – зразок з твердістю 50А; б – зразок з твердістю 80А; в – зразок з твердістю 90А

Рис. 4 – Приклади зразків з різного матеріалу

Вибір зазначених рівнів твердості зумовлений необхідністю комплексного дослідження впливу механічних властивостей матеріалу на ефективність гасіння вібрацій амортизувальними вкладишами, виготовленими методом адитивного 3D-друку. Зміна твердості TPU безпосередньо впливає на його в'язкопружні характеристики, зокрема на здатність матеріалу до деформації, поглинання та розсіювання механічної енергії. Саме тому використання матеріалів з різними значеннями Shore A дозволяє оцінити межі зміни демпфувальних властивостей та визначити оптимальні умови їх застосування в конструкціях протезних систем.

Для керування демпфувальними властивостями досліджуваних зразків у їх внутрішній структурі застосовувалася перфорація, виконана у вигляді регулярної решітки. Такий підхід дозволяє змінювати ефективну жорсткість конструкції та характер деформацій без зміни хімічного складу матеріалу. У дослідженні розглядалися основні параметри перфорації, а саме:

- форма отворів у внутрішній структурі амортизувального вкладиша (трикутна, ромбічна та шестикутна);
- ступінь перфорації за площею (40%, 60% та 80%).

Форма отворів у внутрішній структурі амортизувального вкладиша суттєво впливає на характер локальних деформацій матеріалу та розподіл напружень у зоні контакту. Це, у свою чергу, визначає механізм розсіювання енергії та ефективність гасіння вібрацій при динамічному навантаженні.

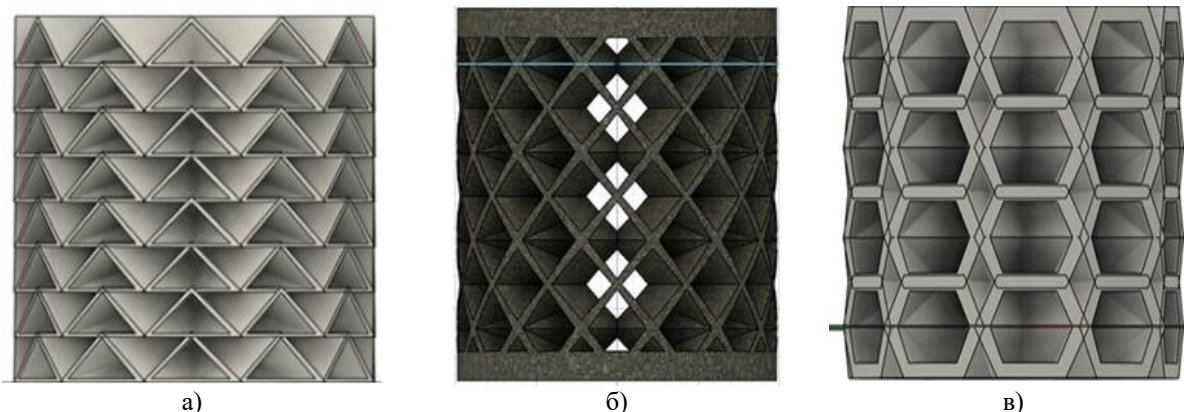
Трикутна перфорація характеризується наявністю гострих вершин, у яких відбувається локальна концентрація напружень. Такі зони є джерелами нерівномірного деформаційного поля, що обмежує розвиток об'ємних і зсувних деформацій у матеріалі. У результаті частина механічної енергії не переходить у в'язкопружні втрати, а повертається у систему, що призводить до зниження ефективності демпфування, особливо для матеріалів із підвищеною жорсткістю.

Ромбічна перфорація забезпечує більш збалансований розподіл напружень порівняно з трикутною формою. Завдяки більш симетричній геометрії та менш вираженим концентраторам напружень ромбічні отвори сприяють рівномірнішій деформації структури. Це забезпечує стабільніші умови розсіювання енергії та, відповідно, середні значення гасіння вібрацій у всьому діапазоні досліджуваних параметрів.

Шестикутна перфорація формує квазіізотропну внутрішню структуру, близьку за поведінкою до стільникових матеріалів. Така геометрія забезпечує рівномірний розподіл деформацій у різних напрямках і сприяє ефективному поглинанню механічної енергії за рахунок розвитку зсувних деформацій та внутрішніх втрат. У результаті шестикутна структура демонструє найвищі показники гасіння вібрацій серед досліджених варіантів.

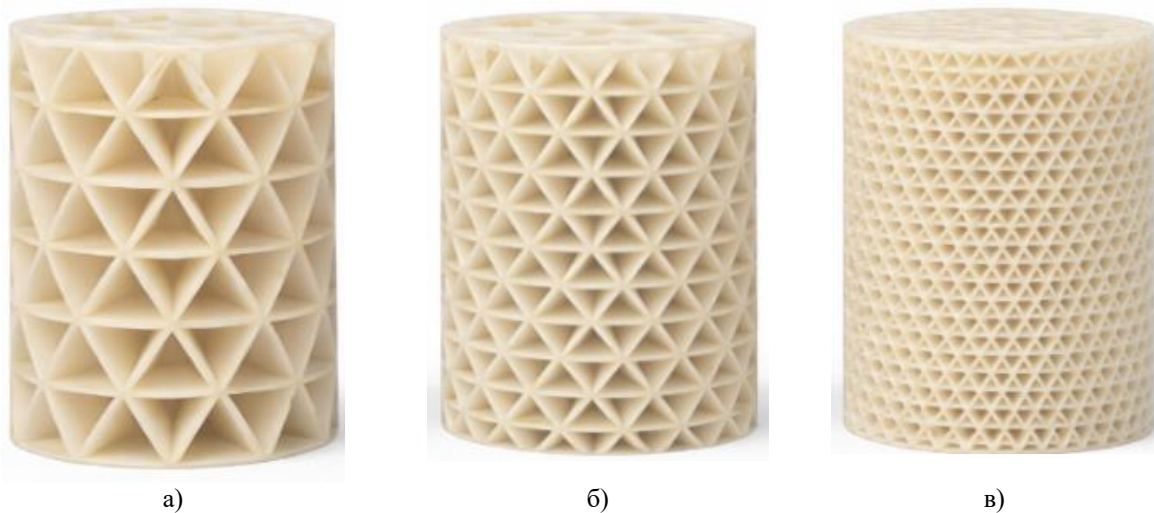
Ступінь перфорації визначає співвідношення між жорсткістю та деформаційною податливістю структури. При збільшенні перфорації зростає здатність матеріалу до деформації та розсіювання енергії, однак надмірне зменшення суцільної частини призводить до ослаблення конструкції та зниження ефективності передачі енергії у демпфувальні механізми. Це обумовлює наявність оптимального діапазону перфорації для кожного типу матеріалу.

У цілому, форма отворів відіграє коригуючу роль у формуванні демпфувальних властивостей амортизувального вкладиша, тоді як визначальними факторами залишаються жорсткість матеріалу та ступінь перфорації. Отримані закономірності підтверджуються експериментальними результатами, наведеними на рис. 5, що демонструють комплексний вплив конструктивних і матеріальних параметрів на ефективність гасіння вібрацій.



а) – трикутна перфорація; б) – ромбічна перфорація; в) – шестикутна перфорація  
Рис. 5 – Моделі тестових зразків

Ступінь перфорації визначався як відношення площі отворів до загальної площі поперечного перерізу зразка, рис. 6. Зміна форми та відсотка перфорації дозволяла варіювати ефективну жорсткість і внутрішні втрати енергії матеріалу без зміни зовнішніх розмірів виробу.



а) б) в)  
а – зразок з відсотком перфорації 40%; б – зразок з відсотком перфорації 60%; в – зразок з відсотком перфорації 80%

Рис. 6 – Приклади різного відсотку перфорації

Усі тестові зразки мали циліндричну форму з фіксованими зовнішніми розмірами, діаметр 40 мм, а висота 60 мм. Зовнішні габарити зразків залишалися незмінними для забезпечення коректного порівняння результатів і виключення впливу геометричних факторів, не пов’язаних з внутрішньою структурою.

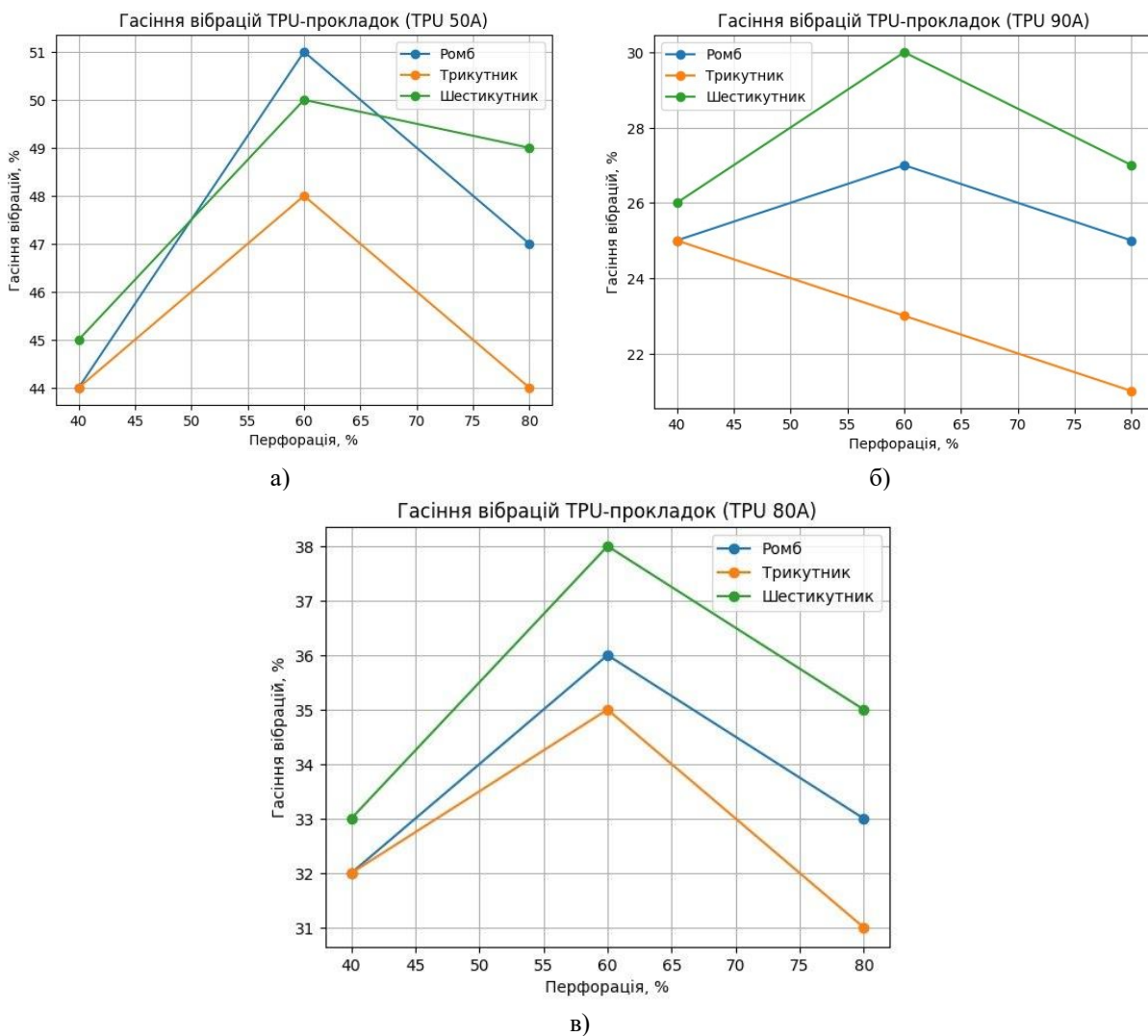
Виходячи з кількості параметрів та варіацій їх значень було виготовлено та досліджено 27 тестових зразків з різним відсотком перфорації форми отворів та твердістю матеріалів, таблиця 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№	Жорсткість TPU	Форма перфорації	Перфорація, %	Гасіння вібрацій, %
1	50А	Ромб	40	44
2	50А	Ромб	60	51
3	50А	Ромб	80	47
4	50А	Трикутник	40	44
5	50А	Трикутник	60	48
6	50А	Трикутник	80	44
7	50А	Шестикутник	40	45
8	50А	Шестикутник	60	50
9	50А	Шестикутник	80	49
10	80А	Ромб	40	32
11	80А	Ромб	60	36
12	80А	Ромб	80	33
13	80А	Трикутник	40	32
14	80А	Трикутник	60	35
15	80А	Трикутник	80	31
16	80А	Шестикутник	40	33
17	80А	Шестикутник	60	38
18	80А	Шестикутник	80	35
19	90А	Ромб	40	25
20	90А	Ромб	60	27
21	90А	Ромб	80	25
22	90А	Трикутник	40	25
23	90А	Трикутник	60	23
24	90А	Трикутник	80	21
25	90А	Шестикутник	40	26
26	90А	Шестикутник	60	30
27	90А	Шестикутник	80	27

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. та представлених графічно на рис. 7, показує, що ефективність гасіння вібрацій залежить від поєднання жорсткості TPU, форми отворів і ступеня перфорації. Для всіх досліджених матеріалів спостерігається нелінійна залежність: максимальні значення демпфування

досягаються переважно при 60% перфорації, після чого при 80% відбувається зниження ефективності.



а – гасіння вібрації TPU прокладки (50A); б – гасіння вібрації TPU прокладки (80A); в – гасіння вібрації TPU прокладки (90A)

Рис. 7 – Результати дослідження

Аналіз побудованих графіків показує, що для всіх досліджених зразків характерною є нелінійна залежність ефективності гасіння вібрацій від ступеня перфорації TPU-прокладок. Зі збільшенням відсотка перфорації від 40% до проміжних значень (близько 60%) спостерігається зростання демпфувальної здатності, після чого при подальшому збільшенні перфорації до 80% ефективність гасіння зменшується.

Наявність такого екстремуму свідчить про конкуренцію двох фізичних механізмів:

- з одного боку, збільшення перфорації підвищує деформаційну здатність матеріалу та внутрішні в'язкопружні втрати;

- з іншого боку, надмірне ослаблення структури призводить до зниження ефективної жорсткості та погіршення передачі енергії у демпфувальні механізми.

Таким чином, ступінь перфорації не може розглядатися як монотонний фактор, а має оптимальне значення, яке забезпечує баланс між жорсткістю та демпфуванням.

Порівняння графіків для різних значень жорсткості TPU показує чітку закономірність: зі збільшенням жорсткості матеріалу рівень гасіння вібрацій систематично зменшується.

Для досліджених зразків максимальні значення гасіння становлять: до  $\approx 51\%$  для TPU з жорсткістю 50A; до  $\approx 38\%$  для TPU 80A; до  $\approx 30\%$  для TPU 90A.

Це пояснюється зменшенням внутрішніх втрат енергії, притаманних в'язкопружній поведінці еластомерів. М'які TPU (50A) здатні до значних зсувних та об'ємних деформацій, що супроводжуються високим рівнем гістерезисних втрат. Для жорстких TPU (90A) деформації є обмеженими, внаслідок чого більша частина енергії коливань не розсіюється, а повертається в систему.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті.

### Фінансування

Фінансування було надано в рамках реалізації державної теми «Мобільна польова лабораторія для оперативного відновлення та виробництва компонентів військової техніки» на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та техніки безпеки (КІТАРБІ) Харківського національного університету радіоелектроніки.

### Висновки.

У роботі досліджено демпфувальні властивості амортизувальних вкладишів з TPU, виготовлених за технологією 3D-друку, з різними значеннями жорсткості та параметрами внутрішньої перфорації. Аналіз експериментальних даних показав, що ефективність гасіння вібрацій має нелінійну залежність від ступеня перфорації, для якої характерна наявність оптимального діапазону. У цьому діапазоні досягається баланс між зменшенням ефективної жорсткості конструкції та зростанням внутрішніх в'язкопружних втрат, що забезпечує максимальне розсіювання коливальної енергії.

Встановлено, що жорсткість матеріалу TPU є визначальним чинником формування демпфувальних властивостей. М'які еластомери характеризуються підвищеною здатністю до гасіння вібрацій завдяки інтенсивним деформаційним процесам і гістерезисним втратам, тоді як зі зростанням жорсткості матеріалу ефективність демпфування зменшується. Форма перфорації впливає на гасіння вібрацій меншою мірою та виконує коригуючу функцію, забезпечуючи незначні відмінності за рахунок особливостей розподілу напружень у матеріалі.

Отримані результати підтверджують доцільність комплексної оптимізації матеріальних і геометричних параметрів амортизувальних вкладишів. Запропонований підхід може бути використаний при проектуванні та вдосконаленні демпфувальних елементів ножних протезів, виготовлених методами адитивного виробництва, з метою підвищення комфорту та зниження вібраційних навантажень під час експлуатації.

Автори висловлюють подяку за всебічну підтримку доктору технічних наук, професор Ігорю Шакировичу Невлюдову –Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату Державної премії в галузі науки і техніки України; Лауреату Державної премії України в галузі освіти, завідувачу кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, ХНУРЕ; колективу Студентського конструкторсько-технологічного бюро «Робототехніка та мехатроніка» кафедри КІТАРБІ, ХНУРЕ.

### Список літератури:

1. Ahn, S.J., Lee, H. and Cho, K.-J. (2024) "3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients", *Nature Communications*, 15, 3605. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5>
2. Wang, Y., Tan, Q., Pu, F., Boone, D.A. and Zhang, M. (2020) "A review of the application of additive manufacturing in prosthetic and orthotic clinics from a biomechanical perspective", *Engineering*, 6 (11), P. 1258–1266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.019>
3. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. С. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (136)), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
4. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S. and Filippenko, I. (2020) "Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(106), pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210761>
5. Baldock, M., Pickard, N., Prince, M., Kirkwood, S., Chadwell, A., Howard, D., Dickinson, A., Kenney, L., Gill, N. and Curtin, S. (2023) "Adjustable prosthetic sockets: A systematic review of industrial and research design characteristics and their justifications", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20, 147. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01270-0>
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // *CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.*
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. Hassan Beygi, B. and Wong, M.S. (2023) "Contemporary and future development of 3D printing technology in the field of assistive technology, orthotics and prosthetics", *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, 6(2), 42225. DOI: <https://doi.org/10.33137/cpoj.v6i2.42225>
9. Devin, K.M., Tang, J., Hamilton, A.R., Moser, D. and Jiang, L. (2024) "Assessment of 3D-printed mechanical metamaterials for prosthetic liners", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of*

Engineering in Medicine, 238(3), 348–357. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544119231225529>

10. Plesec, V., Hanželič, B. and Harih, G. (2024) "Development of a metamaterial numerical model for improving 3D-printed lower-limb prosthetic liners", Human Systems Engineering and Design (IHSED 2024): Future Trends and Applications, 158, 228–238. DOI: <https://doi.org/10.54941/ahfe1005546>

11. Gritsyuk, V., Nevliudov, I., Zablodskiy, M. and Subramanian, P. (2022) "Estimation of eddy currents and power losses in the rotor of a screw electrothermomechanical converter for additive manufacturing", Machinery and Energetics, 13(2), pp. 41–49. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.41-49](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.41-49)

#### References (transliterated)

1. Ahn, S.J., Lee, H. and Cho, K.-J. (2024) "3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients", Nature Communications, 15, 3605. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5>

2. Wang, Y., Tan, Q., Pu, F., Boone, D.A. and Zhang, M. (2020) "A review of the application of additive manufacturing in prosthetic and orthotic clinics from a biomechanical perspective", Engineering, 6 (11), P. 1258–1266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.019>

3. Nikitin, D. O., Nevlyudov, I. Sh., Zharikova, I. V., Bronnikov, A. I., & Strilets, R. E. (2025). Development of a method for controlling products during photopolymer 3D printing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>

4. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S. and Filippenko, I. (2020) "Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/3(106), pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210761>

5. Baldock, M., Pickard, N., Prince, M., Kirkwood, S., Chadwell, A., Howard, D., Dickinson, A., Kenney, L., Gill, N. and Curtin, S. (2023) "Adjustable prosthetic sockets: A systematic review of industrial and research design characteristics and their justifications", Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 20, 147. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01270-0>

6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.

7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.

8. Hassan Beygi, B. and Wong, M.S. (2023) "Contemporary and future development of 3D printing technology in the field of assistive technology, orthotics and prosthetics", Canadian Prosthetics & Orthotics Journal, 6(2), 42225. DOI: <https://doi.org/10.33137/cpoj.v6i2.42225>

9. Devin, K.M., Tang, J., Hamilton, A.R., Moser, D. and Jiang, L. (2024) "Assessment of 3D-printed mechanical metamaterials for prosthetic liners", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 238(3), 348–357. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544119231225529>

10. Plesec, V., Hanželič, B. and Harih, G. (2024) "Development of a metamaterial numerical model for improving 3D-printed lower-limb prosthetic liners", Human Systems Engineering and Design (IHSED 2024): Future Trends and Applications, 158, 228–238. DOI: <https://doi.org/10.54941/ahfe1005546>

11. Gritsyuk, V., Nevliudov, I., Zablodskiy, M. and Subramanian, P. (2022) "Estimation of eddy currents and power losses in the rotor of a screw electrothermomechanical converter for additive manufacturing", Machinery and Energetics, 13(2), pp. 41–49. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.41-49](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.41-49)

*Надійшла (received) 21.01.2026*

#### *Відомості про авторів / About the Authors/*

**Богдан Місан (Misan Bohdan)** – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТдф) кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ) м. Харків, Україна; e-mail: [bohdan.misan@nure.ua](mailto:bohdan.misan@nure.ua); ORCID AI: <https://orcid.org/0009-0007-4905-9280>.

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60566381800>.

**Дмитро Нікітін (Nikitin Dmytro)** – кандидат технічних наук, доктор філософії (PhD), доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), м. Харків, Україна; e-mail: [dmytro.nikitin@nure.ua](mailto:dmytro.nikitin@nure.ua); ORCID AI: <https://orcid.org/0000-0002-5591-4438>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59412787100>.

**НОВИКОВ Ф. В.****ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Метою дослідження є аналітичне визначення та обґрунтування умов підвищення точності механічної обробки шляхом зменшення величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, для створення технологічних процесів високоточної лезової та абразивної обробки. Для цього отримано узагальнюючі теоретичні рішення щодо аналітичного визначення складових сили різання, енергоємності обробки, пружних переміщень у технологічній системі. Аналітично встановлено, що сила різання під час лезової обробки (точіння) завжди менше, ніж під час абразивної обробки (шліфування) завдяки зменшенню енергоємності обробки. При цьому під час лезової обробки переважає тангенціальна складова сили різання, а під час шліфування – радіальна складова сили різання, що визначає точність обробки. Аналітично встановлено, що найменший час обробки для забезпечення заданої точності обробки під час шліфування досягається за умови створення в технологічній системі певного початкового натягу, який залежить в основному від ріжучої здатності шліфувального круга. Також встановлено, що підвищити точність обробки можна застосуванням високошвидкісного різання. При цьому схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки фактично рівнозначні. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску. Наведено практичні рекомендації щодо створення ефективних технологічних процесів механічної обробки.

**Ключові слова:** величина пружного переміщення, технологічна система, початковий натяг, сила різання, шліфування, перехід

**NOVIKOV F.****THEORETICAL SUBSTITUTION OF THE CONDITIONS FOR PROVIDING HIGH-PRECISION MECHANICAL PROCESSING**

The purpose of the study is to analytically determine and substantiate the conditions for increasing the accuracy of mechanical processing by reducing the amount of elastic displacement arising in the technological system, to create technological processes of high-precision blade and abrasive processing. For this purpose, generalizing theoretical solutions were obtained for the analytical determination of the components of the cutting force, processing energy intensity, and elastic displacements in the technological system. It was analytically established that the cutting force during blade processing (turning) is always less than during abrasive processing (grinding) due to the reduction in processing energy intensity. At the same time, during blade processing, the tangential component of the cutting force prevails, and during grinding, the radial component of the cutting force, which determines the accuracy of processing. It was analytically established that the smallest processing time to ensure the specified processing accuracy during grinding is achieved under the condition of creating a certain initial tension in the technological system, which depends mainly on the cutting ability of the grinding wheel. It was also established that the machining accuracy can be increased by using high-speed cutting. In this case, the single-pass and multi-pass machining schemes are actually equivalent. The effectiveness of the automated process of circular external grinding in one pass, which includes only the transition of nursing with the creation of an initial tension in the technological system, equal to or multiple of the amount of allowance being removed, has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. The conditions for reducing the main machining time for a given accuracy of the machined surface, which are due to the transition from discrete to continuous nature of allowance removal, have been determined. Practical recommendations for creating effective technological processes of mechanical machining are given.

**Keywords:** elastic displacement value, technological system, initial tension, cutting force, grinding, transition

**Вступ.** Сучасний розвиток машинобудування вимагає виготовлення високоточних та високоякісних деталей машин, які забезпечують створення конкурентоздатної машинобудівної продукції. Це досягається завдяки застосуванню високоефективних технологій обробки матеріалів різанням, що характеризуються найменшою енергоємністю і найбільшою продуктивністю обробки (із усього різноманіття технологій обробки матеріалів, заснованих на використанні різних видів енергії) та забезпечують високі показники якості й точності оброблюваних поверхонь. Зараз технології обробки матеріалів різанням набули широкого застосування у виробництві та у найближчі роки не втратять своєї значимості. Це пов'язано, в першу чергу, із широким застосування сучасних високооборотних металообробних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр", ріжучих лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями, високоефективних технологій фінішної абразивної обробки тощо. Тому їхній подальший розвиток має велике наукове і практичне значення, особливо, в напрямі забезпечення високої точності обробки без зниження продуктивності. У зв'язку із цим, у роботі вирішується актуальне завдання теоретичного обґрунтування умов забезпечення високоточної механічної обробки на основі аналізу та порівняння з єдиних позицій технологій лезової та абразивної обробки.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Питанням виявлення найбільш ефективних напрямів підвищення точності механічної обробки матеріалів різанням в науково-технічній літературі постійно приділяють значну увагу. У роботах [1 – 3] теоретично обґрунтовано шляхи забезпечення точності обробки лезовими та абразивними інструментами. Однак вони базуються в основному на результатах експериментальних досліджень, які обмежені діапазонами зміни параметрів режимів різання, характеристик ріжучих інструментів тощо. Крім того, окремо розглядаються процеси лезової та абразивної обробки, що не дозволяє встановити узагальнюючі теоретичні рішення щодо точності обробки та провести на їх основі порівняння різних методів обробки [4, 5]. У роботах [6, 7] наведено аналітичні рішення та обґрунтовано шляхи підвищення точності обробки під час шліфування. Це нові підходи, які відкривають значні можливості визначення оптимальних умов шліфування в широких діапазонах зміни параметрів режимів різання та

характеристик абразивних інструментів. Важливими у цьому напрямі слід розглядати також розроблені математичні моделі визначення параметрів точності в умовах лезової та абразивної обробки із урахуванням величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, яке є визначальним в структурі формування точності обробки [8, 9]. Тому їх подальший розвиток дозволить встановити узагальнюючі теоретичні рішення, провести аналіз і оптимізацію параметрів механічної обробки за критерієм величини пружного переміщення та на цій основі розробити практичні рекомендації.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є аналітичне визначення та обґрунтування умов підвищення точності механічної обробки шляхом зменшення величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, для створення технологічних процесів високоточної лезової та абразивної обробки.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити узагальнюючий аналітичний підхід до визначення величини пружного переміщення, виникаючого під час механічної обробки, та обґрунтувати умови його зменшення для забезпечення високої точності обробки;
- провести аналіз аналітичних залежностей для визначення сили різання та обґрунтувати умови її зменшення під час лезової та абразивної обробки;
- теоретично та експериментально обґрунтувати оптимальний технологічний процес круглого шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки із урахуванням величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі;
- теоретично обґрунтувати ефективність застосування пружної схеми шліфування із початковим натягом у технологічній системі та розробити практичні рекомендації щодо створення високоефективних технологічних процесів високоточної механічної обробки.

**Матеріали дослідження.** Для досягнення поставленої мети встановлено аналітичні залежності для розрахунку тангенціальної  $P_z$  і радіальної  $P_y$  складових сили різання, умовного напруження різання  $\sigma$  та коефіцієнта різання  $K_{pi3} = P_z / P_y$  під час лезової обробки (точіння) і шліфування [8, 9]:

$$P_z = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \left[ \operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \operatorname{tg}(\psi - \gamma) \cdot \left[ \operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = \sigma_{cm} \cdot \left[ \operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (3)$$

$$K_{pi3} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma) = \frac{1 + f \cdot \operatorname{tg} \gamma}{f - \operatorname{tg} \gamma}, \quad (4)$$

де  $a, b$  – товщина і ширина зрізу, м;  $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стискання оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  $\psi$  – умовний кут тертя на передній поверхні ріжучого інструмента ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коефіцієнт тертя);  $\gamma$  – передній кут ріжучого інструмента.

Із залежностей (1) і (2) випливає, що за умови  $K_{pi3} = 1$  складові сили різання  $P_z$  і  $P_y$  рівні між собою, а за умов  $K_{pi3} < 1$  і  $K_{pi3} > 1$  справедливі, відповідно, умови  $P_z < P_y$  і  $P_z > P_y$ . Як відомо, умова  $K_{pi3} < 1$  реалізується під час абразивної обробки, а умова  $K_{pi3} > 1$  – під час лезової обробки. Отже, під час абразивної обробки найбільше впливає на технологічні параметри процесу радіальна  $P_y$  складова сили різання, а під час лезової обробки – тангенціальна  $P_z$  складова сили різання. При цьому складові сили різання під час лезової обробки ( $K_{pi3} > 1$ ) менше, ніж під час абразивної обробки ( $K_{pi3} < 1$ ), що обумовлено меншими значеннями умовного напруження різання  $\sigma$  (енергоємності обробки), яке за умови  $K_{pi3} \rightarrow \infty$  прагне прийняти значення  $\sigma_{cm}$  (рис. 1). У цьому випадку умови стружкоутворення відповідають умовам руйнування прямолінійного зразка під час його стискання.

Як впливає із наведених залежностей, лезова обробка реалізується за умови  $\omega = \psi - \gamma < 45^\circ$ , а абразивна обробка – за умови  $\omega = \psi - \gamma > 45^\circ$  (із урахуванням негативного значення кута  $\gamma$  – за умови  $\omega = \psi + \gamma > 45^\circ$ ), де  $\omega$  – кут дії. Із залежності (4) випливає, що умова  $K_{pi3} \rightarrow \infty$  (або  $\sigma \rightarrow \sigma_{cm}$ ) виконується для кута  $\omega = \psi - \gamma \rightarrow 0$  (або за умови  $f = \operatorname{tg} \gamma$ ). Найбільш просто цю умову можна реалізувати під час обробки алмазним інструментом,

оскільки алмаз характеризується найменшим коефіцієнтом тертя  $f$  із оброблюваним матеріалом. Цим пояснюється можливість суттєвого зменшення сили різання під час алмазного точіння, що спостерігається на практиці. За умови  $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$  умовне напруження різання приймає нескінченне значення  $\sigma \rightarrow \infty$ . У цьому випадку процес різання (стружкоутворення) не реалізується, може мати місце лише пружно-пластичне деформування оброблюваного матеріалу без утворення стружки. Отже, процес різання лезовими та абразивними інструментами.

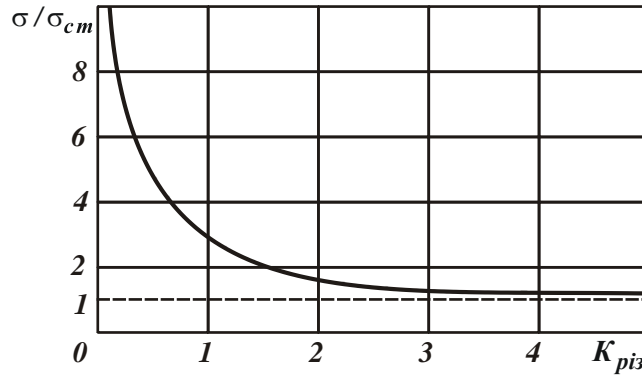


Рис. 1 – Залежність відношення  $\sigma/\sigma_{cm}$  від коефіцієнта різання  $K_{piz}$

На основі наведених залежностей (1–4) виконано розрахунок величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі та визначає похибку обробки. Зважаючи на те, що формування параметрів точності обробки відбувається, як правило, на фінішних операціях абразивної обробки, отримано аналітичну залежність для визначення величини пружного переміщення  $y$  під час круглого поздовжнього шліфування за жорсткою схемою (рис. 2):

$$y = y_{cm} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \tag{5}$$

де  $y_{cm} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}$  – стале значення пружного переміщення  $y$ , м;  $K_{ш} = K_{piz} = P_z / P_y$ ;  $c$  – наведена жорсткість технологічної системи, Н/м;  $Q_{ном} = S \cdot V_{дет} \cdot t$  – номінальна продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – поздовжня подача, м/об.;  $V_{дет}$  – швидкість обертання деталі, м/с;  $t$  – номінальна глибина шліфування, м;  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с;  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot t}{\sigma \cdot Q_{ном}}$  – уточнення на проході круга;  $n$  – кількість проходів круга.

Як впливає із рис. 2, зі збільшенням кількості проходів круга  $n$  величина пружного переміщення  $y$  збільшується, асимптотично наближаючись до сталого значення  $y_{cm}$ . У цьому випадку фактична глибина шліфування наближається до номінальної глибини шліфування  $t$ . Очевидно, чим більше  $\varepsilon$ , тим коротший за часом перехідний процес, протягом якого величина  $y$  досягає найбільшого значення  $y_{cm}$ .

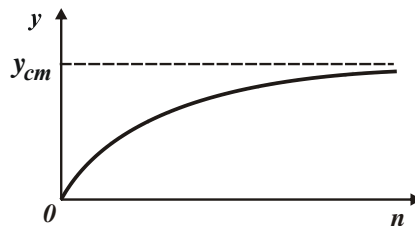


Рис. 2 – Залежність величини  $y$  від кількості проходів круга  $n$

Щоб виключити перехідний процес і підвищити ефективність обробки, необхідно створити в технологічній системі початковий натяг, який дорівнює величині  $y_{cm}$ . Тоді залежність (5) набуде вигляду:

$$y \approx y_{cm} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}. \tag{6}$$

Зменшити величину  $y$  та, відповідно, похибку обробки без зменшення номінальної продуктивності обробки  $Q_{ном}$  можна зменшенням умовного напруження різання  $\sigma$  та збільшенням параметрів  $K_{ш}$ ,  $c$  і  $V_{кр}$ . Це

досягається, в першу чергу, забезпеченням високої ріжучої здатності шліфувального круга, тобто зменшенням відношення  $\sigma / K_{ш}$ , що входить у залежність (6):

$$\frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\sigma_p}{K_{ш.p}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{P_{y.mp}}{P_y}\right)}, \quad (7)$$

де  $\sigma_p$ ,  $K_{ш.p}$  – складові величин  $\sigma$  і  $K_{ш}$ , які обумовлено процесом "чистого різання" абразивними зернами круга без урахування тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом;  $P_{y.mp}$  – радіальна складова сили різання, яка обумовлена тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом ( $P_{y.mp} < P_y$ ), Н.

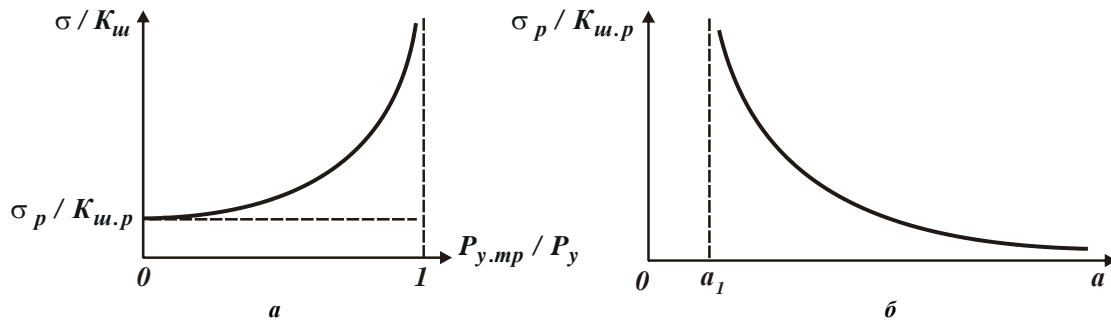


Рис. 3 – Залежності  $\sigma / K_{ш}$  від  $P_{y.mp} / P_y$  (а) та  $\sigma_p / K_{ш.p}$  від  $\alpha$  (б)

Із залежності (7) випливає, що чим більше відношення  $P_{y.mp} / P_y$ , тим більше відношення  $\sigma / K_{ш}$ , яке може суттєво перевищувати значення  $\sigma_p / K_{ш.p}$  (рис. 3,а). Це підтверджується експериментальними даними, згідно яким відношення  $\sigma / K_{ш}$  може до 100 разів перевищувати відношення  $\sigma_p / K_{ш.p}$ , наприклад, під час шліфування алмазними кругами на міцних металевих зв'язках, які в процесі шліфування втрачають ріжучу здатність. Тому, щоб зменшити відношення  $\sigma / K_{ш}$  до значення  $\sigma_p / K_{ш.p}$ , необхідно в процесі шліфування постійно підтримувати високу ріжучу здатність круга, використовуючи ефективні методи правлення (механічні та електрофізикохімічні) [10]. Це дозволить фактично виключити тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом, а також вчасно видаляти з робочої поверхні круга затуплені зерна. Інакше, щоб зменшити величину  $\sigma$ , відповідно залежності (6), необхідно зменшувати відношення  $\sigma_p / K_{ш.p}$ , що описується аналітичною залежністю:

$$\frac{\sigma_p}{K_{piз}} = \frac{\sigma_{cm}}{K_{piз}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{piз}^2}\right) = \frac{\sigma_{cm}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\omega}{2}\right)} - 1 \right]. \quad (8)$$

Розраховані за залежністю (8) значення безрозмірної величини  $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$  наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахункові значення безрозмірної величини  $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$

$\omega = \psi + \gamma$ , град.	0	10	30	45	60	80	90
$\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$	0	0,21	1	2,56	6,5	65	$\infty$

Як випливає із табл. 1, зі збільшенням кута дії  $\omega$  відношення  $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$  необмежено збільшується. Отже, зменшити відношення  $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$  можна винятково зменшенням кута дії  $\omega = \psi + \gamma$  шляхом застосування в якості абразивних матеріалів синтетичні надтверді матеріали (алмаз, ельбор тощо), які внаслідок високої гостроти ріжучих кромки і невеликих коефіцієнтів тертя із оброблюваними матеріалами дозволяють зменшити кути  $\psi$  та  $\gamma$ .

Розглядаючи ріжуче зерно у формі сфери радіусом  $R$ , визначено коефіцієнт  $K_{ш.р} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - f$ , умовне напруження різання  $\sigma_p = \frac{\sigma_{см}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right)}$  та відношення  $\sigma_p = \frac{\sigma_{см}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right)}$ . Як видно, відношення  $\sigma_p / K_{ш.р}$  тим

менше, чим більше відношення  $a/R$  і менше коефіцієнт тертя  $f$ . За умови  $\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right) < 0$  процес різання (стружкоутворення) нездійснений, можливий лише процес пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу. У цьому випадку  $\sigma_p / K_{ш.р} \rightarrow \infty$ . Отже, процес різання починається зі значення  $a/R > f^2/2$ . Наприклад, за умови  $f = 0,2$  граничне значення  $a/R = 0,02$ , за умови  $f = 0,3$ , відповідно,  $a/R = 0,045$ , а за умови  $f = 0,4$  граничне значення  $a/R = 0,08$ . Це погодиться із відомими експериментальними даними [3].

На рис. 3,б показано характер зміни відношення  $\sigma_p / K_{ш.р}$  від товщини зрізу  $a$ . Гранична товщина зрізу  $a_1$ , за якою процес пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання (стружкоутворення) визначається:  $a_1 = 0,5 \cdot R \cdot f^2$ . Таким чином, встановлено, що домогтися високої точності обробки (як під час абразивної, так і під час лезової обробки) можна шляхом застосування високошвидкісного різання [1, 5]. Це витікає із перетвореної (щодо процесу точіння) залежності (6):

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{різ} \cdot c \cdot V}, \tag{9}$$

де  $Q_{ном} = S \cdot V \cdot t$  – номінальна продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – подача, м/об.;  $V$  – швидкість різання, м/с.

Як видно, зменшити величину пружного переміщення  $y$  за заданою номінальною продуктивністю обробки  $Q_{ном}$  можна, в першу чергу, шляхом збільшення швидкості різання  $V$ . Сталість значення  $Q_{ном}$  досягається завдяки зменшенню подачі  $S$  та глибини різання  $t$ . Із іншого боку, збільшити  $Q_{ном}$  за заданим значенням  $y$  також можна завдяки збільшенню швидкості різання  $V$ , тобто застосовуючи високошвидкісне різання. Для більш загального подання та аналізу величини пружного переміщення  $y$ , що визначає похибку обробки, залежність (5) слід подати у вигляді:

$$y = B_{баз} \cdot \Pi \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_{баз} \cdot n}\right)^n} \right], \tag{10}$$

де  $B_{баз} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}$  – безрозмірний параметр;  $\Pi$  – припуск, що знімається, м.

Отримана залежність погоджує величину пружного переміщення  $y$  із кількістю поздовжніх ходів ріжучого інструмента  $n$  за заданою номінальною продуктивністю обробки  $Q_{ном}$ . Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості поздовжніх ходів ріжучого інструмента  $n$  величина пружного переміщення  $y$  залишається майже постійною (рис. 4). Отже, фактично із однаковою ефективністю (точністю і продуктивністю обробки) знімання заданого припуску  $\Pi$  можна виконувати як за один, так і за декілька проходів ріжучого інструмента, тобто схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки в цьому випадку фактично рівнозначні.

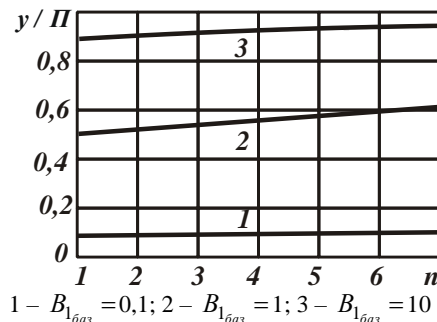


Рис. 4 – Залежність величини  $y/\Pi$  від кількості проходів круга  $n$ .

Із цього витікає доцільність знімання всього припуску, наприклад, під час розточування отвору за один прохід ріжучого інструмента, а під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою – за декілька проходів круга (у зв'язку із більш високими значеннями відношення  $\sigma/K_{ш}$ ), що погодиться із практичними даними [5].

Розглянемо процес круглого шліфування, який здійснюється за два переходи (чорнове шліфування і виходжування), та аналітично визначимо основний час обробки  $\tau$  на цих двох переходах. Потім, приймаючи обмеження задану точність обробки, обумовлену величиною пружного переміщення  $y_0$  на переході виходжування, встановимо найменший основний час обробки за два переходи, розглядаючи його критерієм оптимізації. У результаті виконаних розрахунків отримано залежність для визначення основного часу обробки за два переходи:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left\{ \frac{g}{y_1} + \pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot n_2 \cdot \left[ \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right] \right\}, \quad (11)$$

де  $\tau_1$ ,  $x = \Pi / y_{cm1}$  – основний час обробки, відповідно, на переходах чорнового шліфування та виходжування, с;  $y_1$ ,  $y_0$  – величини пружного переміщення, що виникають у технологічній системі, відповідно, на переходах чорнового шліфування та виходжування, м;  $g = \pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot \Pi$  – об'єм металу, що знімається із оброблюваної деталі, м<sup>3</sup>;  $D_{дем}$ ,  $l$  – діаметр і довжина оброблюваної деталі, м;  $\Pi$  – величина припуску, що знімається, м;  $n_2$  – кількість поздовжніх ходів круга на переході виходжування.

Із залежності (11) випливає, що основний час обробки  $\tau$  неоднозначно залежить від двох змінних величин  $y_1$  і  $n_2$ . Причому, величина  $y_1$  входить у два доданки залежності (11), а величина  $n_2$  – лише в другий доданок, який визначає основний час обробки на переході виходжування. Отже, ці дві величини –  $y_1$  і  $n_2$  – необхідно розглядати як параметри оптимізації (змінні величини). Для визначення екстремального значення часу обробки  $\tau$ , що визначається залежністю (11), слід підкорити час обробки  $\tau$  необхідній умові екстремуму  $\tau'_{y_1} = 0$ ;

$\tau'_{n_2} = 0$ . Тоді отримано:  $y_{1експ} = \Pi^{\frac{n_2}{1+n_2}} \cdot y_0^{\frac{1}{1+n_2}}$ ;  $\left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \left( 1 - \frac{\ln y_1}{n_2} \right) = 1$ . Як показали розрахунки, другі похідні  $P_{y,2}$  і  $P_{n,2}$  у точках екстремумів позитивні. Отже, мають місце мінімуми основного часу обробки  $\tau$  (рис. 5).

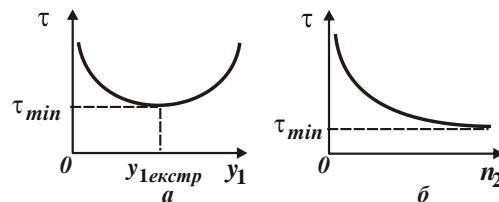


Рис. 5 – Залежність часу обробки  $\tau$  від  $y_1$  (а) і  $n_2$  (б)

За умови  $n_2 \rightarrow \infty$  маємо  $y_{1експ} = \Pi$ . Отже, на переході чорнового шліфування знімання оброблюваного матеріалу відсутнє, оскільки величина пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, дорівнює величині припуску  $\Pi$ . Знімання металу та формування заданої точності обробки відбувається на переході виходжування. Тому, щоб суттєво зменшити основний час обробки на переході чорнового шліфування, необхідно даний перехід здійснювати із прискореною радіальною подачею, створюючи в технологічній системі початковий натяг, який дорівнює величині припуску  $\Pi$ . У цьому випадку  $\tau_1 \approx 0$ , тоді мінімальний основний час обробки розглянутого процесу круглого шліфування визначається залежністю:

$$\tau_{min} \approx \tau_2 = \frac{\pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot \sigma \cdot n_2}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left[ \left( \frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]. \quad (12)$$

Підкоряючи залежність (12) правилу Лопітала, отримано:

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \lim_{n_2 \rightarrow \infty} \frac{\left[ \left( \frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]_{n_2}}{\left( \frac{1}{n_2} \right)_{n_2}} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \left( \frac{\Pi}{y_0} \right). \quad (13)$$

Як видно, у залежності (12) переважає множник, укладений у квадратні дужки. Зі збільшенням  $n_2$  це приводить до зменшення основного часу обробки  $\tau_{min}$ . Збільшення  $n_2 \rightarrow \infty$  припускає збільшення швидкості обертання деталі  $V_{dem} \rightarrow \infty$ . Очевидно, у реальних умовах шліфування збільшення  $V_{dem} \rightarrow \infty$  обмежено технічними можливостями круглошліфувального верстата. Тому параметр  $n_2$  буде приймати не нескінченні, а кінцеві значення. Це указує на неповне використання технологічних можливостей процесу круглого зовнішнього шліфування, оскільки основний час обробки  $\tau_{min}$  буде приймати значення, відповідно, більші значень, розрахованих за залежністю (13). Збільшити швидкість поздовжньої подачі  $S_m = V_{dem} \cdot S / (\pi \cdot D_{dem})$  можна встановленням максимальних значень швидкості обертання деталі  $V_{dem}$  і поздовжньої подачі  $S$  (м/об).

Із залежності (13) випливає, що зменшити основний час обробки  $\tau_{min}$  можна зменшенням параметрів  $D_{dem}$ ,  $l$ ,  $\Pi$ ,  $\sigma$  і збільшенням  $c$ ,  $K_{ш}$ ,  $V_{кр}$ ,  $y_0$ . Зважаючи на те, що змінними параметрами є  $\sigma$  та  $K_{ш}$ , зменшити основний час обробки  $\tau_{min}$  можна, головним чином, шляхом підвищення ріжучої здатності шліфувального круга. Таким чином, теоретично обґрунтовано ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається, і застосуванням високочастотних осцилюючих поздовжніх рухів стола верстата (або шліфувального круга). При цьому швидкість обертання деталі необхідно встановлювати максимально можливою, виходячи із технічних характеристик круглошліфувального верстата. Такий режим шліфування забезпечить одержання необхідних показників точності та якості обробленої поверхні за найменшим основним часом процесу круглого зовнішнього поздовжнього шліфування. Отримане теоретичне рішення дозволяє уточнити відоме рішення, відповідно до якого застосовуваний на практиці автоматизований процес круглого шліфування виконується за декілька переходів, включаючи чорнове (чистове) шліфування та виходжування [3]. Як встановлено теоретично, цей процес менш продуктивний порівняно із запропонованим процесом шліфування.

Для перевірки правильності отриманих теоретичних рішень проведено експериментальні дослідження. Для цього здійснювали обробку отворів діаметром 100 мм і висотою 150 мм в деталях із сталі 18ХГН2МФБ твердістю HRC 57 ... 63 із застосуванням абразивного круга 1A1 100×20×62 25A 25 СМ1 8 із режимом шліфування:  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_{dem} = 30$  м/хв; швидкість поздовжньої подачі  $S_{позд} = 1,5$  м/хв; тривалість поздовжнього ходу круга 7 с. Експериментально встановлено (рис. 6), що утворення пружних переміщень у технологічній системі під час шліфування узгоджується з аналітичними залежностями. Встановлено, що під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою у зв'язку з відносно низькою жорсткістю технологічної системи ( $c = 2,6 \cdot 10^6$  Н/м) величина пружного переміщення із часом обробки необмежено збільшується. Це вимагає здійснення періодичного виходжування, що різко зменшує продуктивність обробки. Тому в цих умовах весь припуск доцільно знімати за пружною схемою шліфування з початковим натягом (рис. 7), рівним або кратним величині припуску, що знімається (тобто за схемою виходжування із відключеною радіальною подачею).

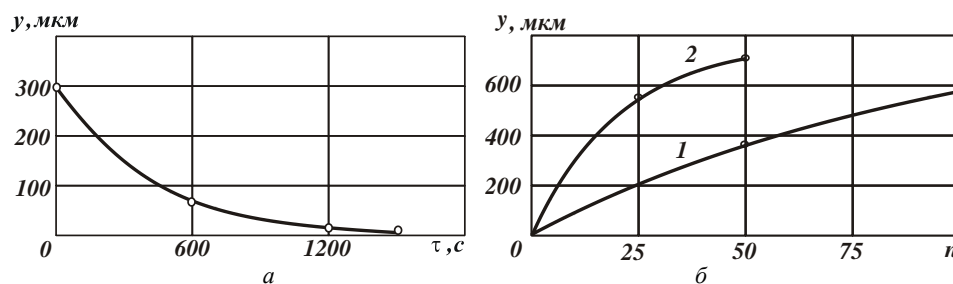


Рис. 6 – Залежності пружного переміщення у від часу обробки  $\tau$  в умовах виходжування (а) та від кількості проходів круга  $n$  в умовах шліфування за жорсткою схемою (б): 1 –  $t = 0,01$  мм; 2 –  $t = 0,02$  мм

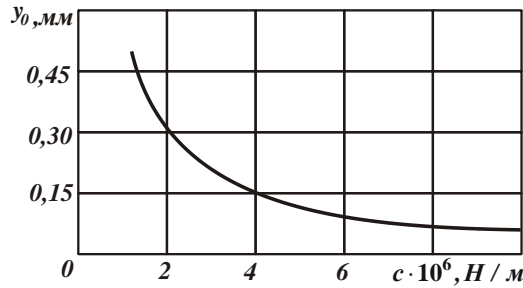


Рис. 7 – Залежність граничних значень початкових натягів  $y_0$  від жорсткості технологічної системи  $c$

Експериментально встановлено, що під час знімання припуску 0,5 мм на сторону обробку ефективно виконувати за 3 переходи за пружною схемою шліфування із створенням в технологічній системі початкових натягів на кожному переході, рівних, відповідно: 0,25 мм, 0,25 мм, 0,02 мм. У цьому випадку продуктивність обробки збільшується до 2 разів і забезпечуються вимоги за точністю розміру (у межах 10 мкм) і шорсткістю ( $R_a < 0,63$  мкм) оброблюваної поверхні, фактично виключаються коливання в технологічній системі. На оброблених поверхнях відсутні припідкання та мікротріщини. На 30 % знижуються витрати абразивних кругів у зв'язку зі зменшенням їх зношування. Експериментально встановлено, що застосування цього способу обробки дозволяє до 2 разів зменшити час охолодження оброблюваної деталі після шліфування (яке здійснюється без знімання нагрітої деталі з верстата) з метою усунення її термопружних деформацій і підвищення точності обробки [11]. Це пов'язано з тим, що кількість тепла  $Q_{вих}$  (рис. 8), яке виділяється під час шліфування за схемою виходжування, до 3-х разів менше, ніж під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою ( $Q_{впіз}$ ).

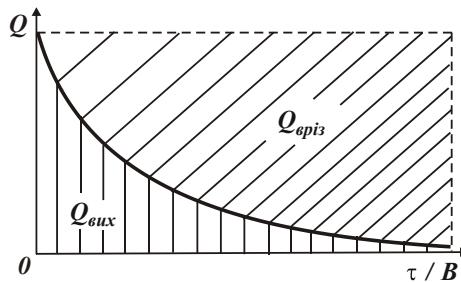


Рис. 8 – Залежність  $Q_{вих}$  і  $Q_{впіз}$  від відносної величини  $\tau / B$

Величина  $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$  – постійна часу утворення пружного переміщення в технологічній системі, с;

$F$  – площа поперечного перетину оброблюваної деталі, м<sup>2</sup>.

Аналітично визначимо умови підвищення точності та продуктивності обробки для спрощеної схеми шліфування деталі, яка рухається за нормаллю до робочої поверхні круга із постійною швидкістю  $V_0$ .

Використовуючи рівняння балансу переміщень у технологічній системі  $V_0 \cdot \tau = \int_0^\tau V(\tau) \cdot d\tau + y$ , яке можна записати

диференціальним рівнянням  $B \cdot V'(\tau) + V(\tau) = V_0$ , і розв'язуючи його для початкової умови  $y(\tau=0) = y_0$ , визначено величину пружного переміщення  $y$ :

$$y = y_{cm} + (y_0 - y_{cm}) \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{cm}}} = y_{cm} + (y_0 - y_{cm}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (14)$$

де  $V(\tau)$  – лінійна швидкість знімання припуску, м/с;  $\tau$  – час обробки, с;  $y_0$  – початковий натяг у технологічній системі, м; число  $e \approx 2,72$ ;  $\Pi$  – припуск, що знімається, м;  $y_{cm} = B \cdot V_0$  – величина пружного переміщення у сталому процесі шліфування, м.

Залежність (14) за умови  $y_0 = 0$  є основою для визначення найменшого основного часу обробки  $\tau$  із урахуванням обмеження за точністю розміру оброблюваної поверхні на операції шліфування із дискретно змінюваною за переходами швидкістю переміщення деталі. Під час шліфування у два переходи час обробки  $\tau$  обчислюється:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{y_1}{V_2} = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_{cm1}} + \frac{y_1}{y_{cm2}} \right), \quad (15)$$

де  $\tau_1; \tau_2; V_1; V_2; y_{cm1} = B \cdot V_1; y_{cm2} = B \cdot V_2; y_1$  – відповідно, основний час обробки поверхні деталі (с), швидкість переміщення деталі (м/с), пружні переміщення (м) на першому (1) і на другому (2) переходах.

Застосовуючи уточнення на першому і другому переходах  $\varepsilon_1 = \frac{\Pi}{y_1} = \frac{\tau_1}{B \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})}; \varepsilon_2 = \frac{y_1}{y_2} = \frac{\tau_2}{B \cdot (1 - e^{-\tau_2/B})}$ , із урахуванням сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$  і залежності (15), отримано рівняння для визначення основного часу обробки  $\tau$ :

$$\varepsilon_{сум} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{(\tau - \tau_1)}{B}} - e^{-\frac{\tau_1}{B}} + e^{-\frac{\tau}{B}} \right] = \frac{1}{B^2} \cdot (\tau \cdot \tau_1 - \tau_1^2), \quad (16)$$

де  $y_2$  – пружне переміщення, яке виникає в технологічній системі на 2-му переході та визначає точність розміру оброблюваної поверхні, м.

За наявності екстремуму (мінімуму) функції  $\tau = f(\tau_1)$  залежність (16) набуває вигляду:

$$\varepsilon_{сум} \cdot \left[ -e^{-\frac{(\tau - \tau_1)}{B}} + e^{-\frac{\tau_1}{B}} \right] = \frac{1}{B} \cdot (\tau - 2 \cdot \tau_1). \quad (17)$$

Маємо рішення:  $\tau = 2 \cdot \tau_1$ , тоді  $\tau_1 = \tau_2$ . Звідки  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = \varepsilon^2$  і рівняння (17) набуде вигляду:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\tau_1^2}{B^2 \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})^2}. \quad (18)$$

Для  $\varepsilon_{сум} = 5,376$  і, відповідно,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = 2,319$  із залежності (18) визначено екстремальні (мінімальні) значення відносних величин:  $\tau_1/B = \tau_2/B = 2$ ;  $\tau/B = 4$ , а із залежності (15) – екстремальне значення відношення  $\Pi/y_{cm1} = 2$  (рис. 9,а).

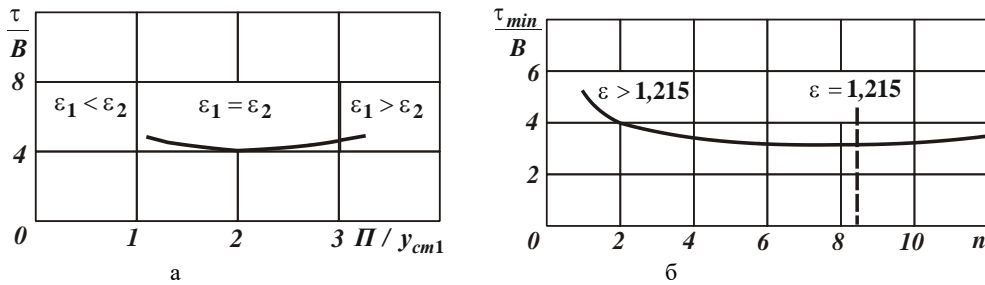


Рис. 9 – Залежності відносної величини  $\tau/B$  від відношення  $\Pi/y_{cm1}$  (а) та відносної величини  $\tau_{min}/B$  від кількості переходів  $n$  (б)

Також визначено відносну величину  $\tau/B$  під час шліфування в три та більше переходів. Загальним рішенням є те, що мінімум відносної величини  $\tau/B$  досягається за однієї й тієї ж тривалості переходів і одних значеннях уточнення на кожному переході, тобто  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n = \varepsilon$ ;  $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1^n = \varepsilon^n$ . Зі збільшенням кількості переходів  $n$  відносна величина  $\tau_1/B$  зменшується, а відносна величина  $\tau/B$  змінюється за екстремальною залежністю, досягаючи мінімального значення за умови  $n = 8$  ( $\varepsilon_{сум} = 5,376$ , рис. 9,б, табл. 2).

Таблиця 2 – Розрахункові значення  $\varepsilon$ ,  $\tau_1/B$  і  $\tau/B$

$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	12
$\varepsilon$	5,376	2,319	1,75	1,52	1,4	1,32	1,235	1,18	1,15
$\tau_1/B$	5,3	2	1,25	0,91	0,72	0,58	0,435	0,35	0,3
$\tau/B$	5,3	4	3,75	3,64	3,6	3,48	3,47	3,5	3,6

Найменший основний час обробки  $\tau_{min}$  під час шліфування в  $n$  переходів із урахуванням залежності (14) для  $y_0 = 0$  та  $y_1 = y$ ;  $x = \Pi/y_{cm1}$  обчислюється за залежністю:

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \frac{\Pi}{y_1}} \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \left[ \frac{x}{(1-e^{-x})} \right]} \cdot x. \quad (19)$$

Величина  $x$  неоднозначно впливає на  $\tau_{min}$ . Після визначення екстремуму функції  $\tau_{min}$  від величини  $x$ , отримано рівняння:  $\ln \left[ \frac{x}{(1-e^{-x})} \right] = 1 - \frac{x \cdot e^{-x}}{(1-e^{-x})}$ . Розрахунками встановлено:  $x = \Pi / y_{cm1} = 0,4$ ;  $y_1 / y_{cm1} = 0,329$ .

Оптимальне уточнення на переході дорівнює  $\varepsilon = \Pi / y_1 = 1,215$ , а сумарне уточнення дорівнює  $\varepsilon_{cym} = 1,215^n$ .

Встановлено, що для сумарного уточнення  $\varepsilon_{cym} = 5,376$  мінімум  $\tau_{min} = 0,4 \cdot n \cdot B = 3,2 \cdot B$ , де  $n = \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 5,376}{\ln 1,215} = \frac{0,68}{0,2} = 8,4$ . Значення  $\tau_{min} = 3,2 \cdot B$  несуттєво відрізняється від значення  $\tau_{min} = 4 \cdot B$ , яке отримано для  $n = 2$  і  $\varepsilon = 2,32$  (рис. 9,б). Отже, майже з однаковою продуктивністю обробки можна шліфування здійснювати в діапазоні  $n = 2 \dots 8$ , тобто зі зміною уточнення  $\varepsilon$  в межах  $1,215 \dots 2,32$ .

Для сумарного уточнення  $\varepsilon_{cym} = 100$  екстремальна кількість переходів дорівнює  $n = \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 100}{\ln 1,215} = 23$ , а  $\tau_{min} = 0,4 \cdot 23 \cdot B = 9,2 \cdot B$ . Розрахунками встановлено, що для  $n = 4 \dots 23$  відносна величина  $\tau / B$  змінюється несуттєво (у межах  $9,2 \dots 12$ ). Тому фактично з мінімальним основним часом обробки можна здійснювати шліфування із  $n = 4 \dots 5$  (тобто із  $\varepsilon = 2,5 \dots 3,15$ ), оскільки подальше збільшення  $n$  не надає відчутного ефекту зменшення  $\tau / B$ . Таким чином, враховуючи нелінійність функції  $V(\tau)$  в залежності  $y = B \cdot V(\tau)$ , виконано уточнений розрахунок найменшого основного часу обробки із урахуванням обмеження за точністю розміру оброблюваної поверхні деталі під час урізного шліфування за жорсткою схемою з дискретно змінюваним в часі характером контакту круга з деталлю.

Для порівняння отримано аналогічні рішення відносно урізного шліфування за жорсткою схемою з постійним контактом круга з деталлю. Основний час обробки  $\tau$  на операції шліфування у два переходи (рис. 10) під час знімання припусків  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  визначається залежністю:

$$\tau = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} = B \cdot \left( \frac{\Pi_1}{y_{cm1}} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right). \quad (20)$$

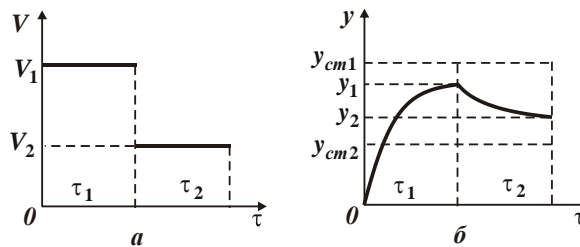


Рис. 10 – Характер зміни швидкості  $V$  (а) і пружного переміщення  $y$  (б) із часом обробки  $\tau$

У даному випадку параметри  $V_1, V_2$  та, відповідно,  $y_{cm1} = B \cdot V_1, y_{cm2} = B \cdot V_2$  – невідомі. Тому слід виразити залежність (20) відносно  $y_{cm1}$  та підставити отриманий вираз у залежність (14), приймаючи на першому переході  $y = y_1; y_0 = 0; y_{cm} = y_{cm1}$ :

$$y_1 = \frac{\Pi_1}{\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right]. \quad (21)$$

Потім після підстановки залежності (21) у залежність (14), приймаючи на другому переході  $y = y_2; y_0 = y_1; y_{cm} = y_{cm2}$ , маємо:

$$y_2 = y_{cm2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}} \right) + \frac{\Pi_1}{\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right] \cdot e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}}. \quad (22)$$

Рівняння (21) і (22) містять лише дві невідомі величини  $y_{cm2}$  і  $\tau/B$ , оскільки параметри  $y_1$  і  $y_{cm1}$  визначають на основі залежності (14), розглядаючи  $y = y_1$ ;  $y_0 = 0$ ;  $y_{cm} = y_{cm1}$  (рис. 11,а, б). За заданими значеннями  $y_2$ ,  $\Pi$ ,  $\Pi_1$  і  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ , на основі рівнянь (21) і (22) встановлено значення  $y_{cm2}$  і  $\tau/B$  (рис. 11,в,г). Як видно, зі збільшенням  $\Pi_1$  відносна величина  $\tau/B$  зменшується, досягаючи мінімального значення за умови  $\Pi_1 = \Pi$ , тобто коли знімання припуску та формування точності обробки відбувається на другому переході. Перший перехід необхідний лише для створення в технологічній системі пружного переміщення (початкового натягу) величиною  $y_1 = \Pi$ . Це указує на ефективність застосування пружної схеми шліфування із початковим натягом у технологічній системі, рівним (схема 1 на рис. 12) або кратним (схема 2 на рис. 12) величині припуску, що знімається.

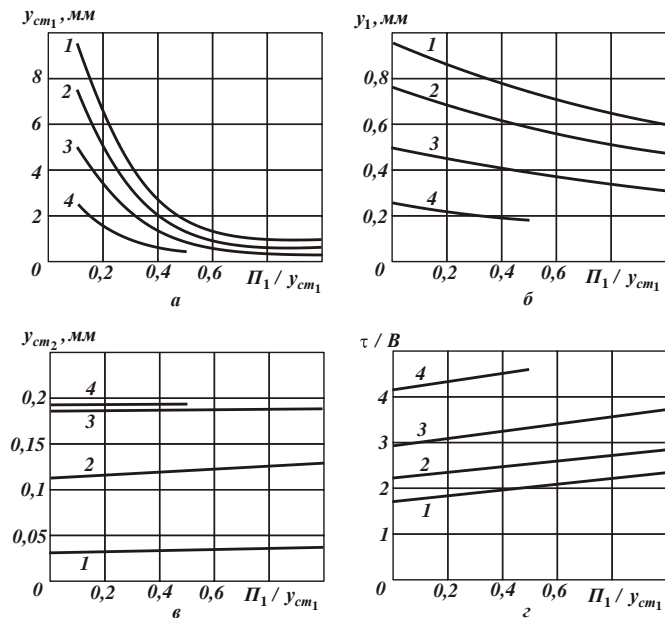


Рис. 11 – Залежності параметрів  $y_{cm1}$  (а),  $y_1$  (б),  $y_{cm2}$  (в) і  $\tau/B$  (г) від відношення  $\Pi_1 / y_{cm1}$ : 1 –  $\Pi_1 = 0,95$  мм;  $\Pi_2 = 0,05$  мм; 2 –  $\Pi_1 = 0,75$  мм;  $\Pi_2 = 0,25$  мм; 3 –  $\Pi_1 = \Pi_2 = 0,5$  мм; 4 –  $\Pi_1 = 0,25$  мм;  $\Pi_2 = 0,75$  мм ( $\Pi = 1$  мм і  $y_2 = 0,186$  мм)

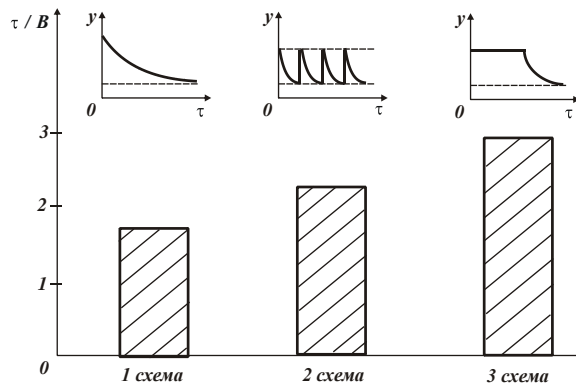


Рис. 12 – Діаграма розподілу значень відносної величини  $\tau/B$  для трьох схем шліфування

Під час шліфування у два переходи, що включає перехід шліфування за жорсткою схемою та перехід шліфування за пружною схемою із початковим натягом у технологічній системі, значно меншим величини знятого припуску (схема 3 на рис. 12), відносна величина  $\tau/B$  та основний час обробки  $\tau$  приймають більші значення. Значення  $\tau/B$  під час шліфування з постійним у часі контактом круга з деталлю (рис. 12) менше, ніж в умовах дискретного контакту (рис. 9). Таким чином, теоретично обґрунтовано закономірності формування похибок обробки поверхонь для різних схем шліфування, включаючи жорстку і пружну схеми та схему виходжування за дискретним і безперервним у часі характером знімання припуску. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску [8]. Встановлено мінімальний основний час обробки залежно від кількості переходів під час шліфування з дискретним характером знімання припуску. При

цьому доведено незначність зміни основного часу обробки в широкому діапазоні зміни уточнення ( $\varepsilon = 1,215 \dots 3,150$ ), внаслідок чого можна виконувати шліфування за чотири або п'ять переходів, зменшуючи трудомісткість обробки із забезпеченням необхідної (заданої) точності оброблюваної поверхні.

**Висновки.** У роботі отримано узагальнюючі теоретичні рішення щодо аналітичного визначення складових сили різання, енергоємності обробки, пружних переміщень у технологічній системі та обґрунтовано умови їх зменшення, які покладено в основу розроблення технологічних процесів високоточної механічної обробки, включаючи лезову та абразивну обробки. Аналітично встановлено, що сила різання під час лезової обробки (точіння) завжди менше, ніж під час абразивної обробки (шліфування) завдяки зменшенню енергоємності обробки: зменшенню кута дії. При цьому під час лезової обробки переважає тангенціальна складова сили різання, а під час шліфування – радіальна складова сили різання. Тому основною умовою високоточної механічної обробки, особливо на операціях абразивної обробки (шліфування), є зменшення радіальної складової сили різання та величини пружного переміщення. Аналітично встановлено, що найменший час обробки для забезпечення заданої точності обробки під час шліфування досягається за умови створення в технологічній системі певного початкового натягу, який залежить в основному від ріжучої здатності шліфувального круга. Також встановлено, що підвищити точність обробки можна застосуванням високошвидкісного різання. При цьому схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки фактично рівнозначні. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску. Наведено практичні рекомендації щодо створення ефективних технологічних процесів механічної обробки.

#### Список літератури:

1. Технологія машинобудування : підручник / О. В. Якимов, В. М. Царюк, О. О. Якимов, Г. О. Оборський, В. П. Ларшин, О. В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. 608 с.
2. Маталин А. А. Технологія машиностроєння : учебник. – Л.: Машиностроєння, 1985. 496 с.
3. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроєння, 1984. 103 с.
4. Зубарь В. П., Тимчук А. Г., Чопенко М. В. Замена шлифования точением // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 травня 2006 р., тези докладів. Харків: Вид-во "Курсор", 2006. С. 73–74.
5. Линчевский П. А., Дзугурян Т. Г., Оргиан А. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. Киев: Техника, 2001. 300 с.
6. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов, 1979. 232 с.
7. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. Харьков: ГП "УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. 448 с.
8. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки. Днепр: ЛИРА, 2018. 400 с.
9. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с.
10. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография. Каменское: ДГТУ, 2016. 529 с.
11. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А. А. Ключко, Е. В. Мироненко, О. А. Анциферова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ, 2015. Вип. № 37. С. 105–111.

#### Bibliography (transliterated):

1. Mechanical engineering technology: textbook / O. V. Yakimov, V. M. Tsaryuk, O. O. Yakimov, G. O. Oborsky, V. P. Larshin, O. V. Samoilenko (2001). – Odesa: Astroprint. 608.
2. Matalin A. A. (1985) Mechanical engineering technology: textbook. – L.: Mechanical engineering. 496.
3. Lurye G. B. (1984) Progressive methods of cylindrical external grinding. L.: Mechanical Engineering. 103.
4. Zubar V. P., Timchuk A. G., Chopenko M. V. (2006) Replacing grinding with turning // Information technologies: science, technology, lighting, health: international. scientific-practical Conf., May 18–19, 2006, abstracts. Kharkiv: View "Cursor", 2006. pp. 73–74.
5. Linchevsky P. A., Dzhuguryan T. G., Orgiyan A. A. (2001) Processing of parts on finishing and boring machines. Kyiv: Tekhnika, 2001. – 300.
6. Novoselov Yu. K. (1979) Dynamics of surface shaping during abrasive processing. Saratov. 232 p.
7. Sizy Yu. A., Stalinskiy D. V. (2016) Dynamics and thermal physics of grinding. Kharkov: State Enterprise "UkrNTC" Energostal ", 2016. 448.
8. Novikov F. V. (2018) Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing. Dnepr: LIRA. 400.
9. Novikov F. V. (2024) Technological support for high-quality and high-precision mechanical processing: monograph. Dnipro: LIRA. 460.
10. Lavrinenko V. I., Solod V. Yu. (2016) Tools from superhard materials in technologies of abrasive and physical-technical processing: monograph. Kamenskoye: DSTU. 529.
11. Technological processes of formation of the surface layer of gear wheels of heavy CNC lathes / A. A. Klochko, E. V. Mironenko, O. A. Antsiferova, etc. (2015). Tool reliability and optimization of technological systems. Collection of scientific works. Kramatorsk. No. 37. 105–111.

Надійшла (received) 02.02.2025

#### Відомості про авторів / About the Authors

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

**ВОРОПАЄВ М. В., НАБОКА О. В.****КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ У МАШИНОБУДУВАННІ**

У статті представлено системний огляд сучасних засобів і систем індустріальної метрології, що застосовуються у виробничих галузях промисловості — машинобудуванні, енергетиці, авіабудуванні та автомобілебудуванні. На основі матеріалів гостьової лекції, проведеної фахівцями компанії «Кода» — офіційного представника концерну Hexagon в Україні, — розглянуто класифікацію вимірювальних систем, їх технічні характеристики, особливості застосування та тенденції автоматизації вимірювальних процесів. Описано стаціонарні координатно-вимірювальні машини (КВМ) різних класів, портативні вимірювальні системи, засоби вимірювання на верстатах, а також роботизовані вимірювальні комплекси. Особливу увагу приділено питанням зворотного інженерингу як сучасного методу відтворення конструкторської документації за наявним зразком деталі.

**Ключові слова:** індустріальна метрологія, координатно-вимірювальна машина, Hexagon, портативні системи, лазерний сканер, зворотній інженеринг, контроль якості, автоматизація вимірювань.

**VOROPAIEV M., NABOKA O.****A COMPREHENSIVE APPROACH TO MODERN MEASUREMENT TOOLS IN MECHANICAL ENGINEERING**

This paper presents a systematic overview of modern industrial metrology tools and systems applied in mechanical engineering, energy, aviation, and automotive industries. Based on materials from a guest lecture delivered by specialists of the Coda company — an official representative of Hexagon in Ukraine — the article examines the classification of measurement systems, their technical characteristics, application specifics, and trends in measurement process automation. Stationary coordinate measuring machines (CMMs) of various classes, portable measurement systems, on-machine measurement tools, and robotic measurement complexes are described. Particular attention is given to reverse engineering as a modern method of reconstructing design documentation from an existing part sample.

**Keywords:** industrial metrology, coordinate measuring machine, Hexagon, portable systems, laser scanner, reverse engineering, quality control, measurement automation.

**Вступ.**

Сучасне машинобудування характеризується постійним зростанням вимог до точності виготовлення деталей і вузлів, що обумовлює необхідність застосування прецизійних засобів вимірювання. Проблема забезпечення метрологічного контролю якості продукції набуває особливої актуальності в умовах впровадження цифрових технологій виробництва та автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Стрімкий розвиток індустрії вимірювальних технологій зумовив появу широкого спектру засобів контролю геометричних параметрів виробів — від класичних стаціонарних координатно-вимірювальних машин (КВМ) до портативних лазерних трекерів і роботизованих вимірювальних комплексів. Провідним світовим виробником таких систем є концерн Hexagon, якому належать понад 15 великих заводів у різних частинах світу, що спеціалізуються на випуску вимірювального обладнання та відповідного програмного забезпечення.

В Україні налічується близько 100 координатно-вимірювальних машин виробництва Hexagon, що функціонують на підприємствах різних галузей — машинобудування, приладобудування, енергетики. Значна частина цих машин поставлена компанією «Кода», яка є офіційним дистриб'ютором Hexagon в Україні та також представляє обладнання таких відомих виробників, як Renishaw (Велика Британія) і Jenoptik Industrial Metrology.

Мета статті — систематизувати актуальну інформацію щодо класів, технічних характеристик і сфер застосування сучасних систем індустріальної метрології, представлених у портфоліо компанії Hexagon, для підвищення обізнаності фахівців у галузі машинобудування та технологій вимірювань.

**Мета дослідження.**

Метою даної роботи є систематизація сучасного портфеля засобів індустріальної метрології — від стаціонарних координатно-вимірювальних машин до портативних і роботизованих систем — та формування практичних рекомендацій щодо вибору вимірювального обладнання для підприємств машинобудівної галузі з урахуванням вимог до точності, умов виробничого середовища та завдань зворотного інженерингу.

**3. Викладення основного матеріалу та результати.**

Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання дослідження:

- розглянути класифікацію систем індустріальної метрології та принципи їх роботи у трьох основних режимах: розмірний контроль, інспекція за CAD-моделлю та зворотній інженеринг;
- проаналізувати технічні характеристики та особливості застосування стаціонарних КВМ різних класів — портальних, цехових, ультрапрецизійних, мостових і мультисенсорних;
- охарактеризувати портативні вимірювальні системи (вимірювальні руки, лазерні трекери, сканери структурованого світла, фотограметричні системи) та їх застосування для великогабаритних об'єктів;
- описати типи датчиків і вимірювальних головок для стаціонарних КВМ — тактильних і безконтактних оптичних;
- розкрити зміст і послідовність процесу зворотного інженерингу, включаючи програмне забезпечення для обробки хмар точок;

- визначити критерії вибору вимірювального обладнання та окреслити провідні тенденції розвитку галузі.

Для порівняльного аналізу класів обладнання застосовано метод зіставлення за ключовими метрологічними характеристиками: точністю, діапазоном вимірювання, мобільністю та умовами експлуатації. Узагальнення практичного досвіду компанії «Кода» щодо впровадження систем на підприємствах України (ДП «Антонов», НКМЗ, Турбоатом та ін.) дозволило сформулювати рекомендації, що мають прикладний характер і орієнтовані на фахівців машинобудівної галузі.

Сучасний портфель метрологічних систем Hexagon охоплює чотири основні класи обладнання: стаціонарні координатно-вимірювальні машини; портативні вимірювальні системи; системи вимірювання на верстатах; роботизовані вимірювальні комплекси. Кожен клас відповідає певному рівню вимог щодо точності, мобільності та ступеня автоматизації вимірювального процесу.

Принципи роботи будь-якої вимірювальної машини реалізуються у трьох основних режимах застосування:

- розмірний контроль (поточковий) — перевірка відповідності виробу кресленню;
- інспекція за CAD-моделлю — порівняння реального виробу із цифровою математичною моделлю (STP, IGES тощо);

– зворотній інженіринг (reverse engineering) — отримання математичної моделі за наявним фізичним зразком деталі.

Слід підкреслити, що у сучасній виробничій практиці понад 95% вимірювань виконується шляхом порівняння реального виробу з CAD-моделлю, оскільки це значно підвищує інформативність і швидкість аналізу геометрії деталі.

#### **Стаціонарні координатно-вимірювальні машини.**

Портальні КВМ загального застосування. Портальні КВМ є найбільш поширеним класом стаціонарних вимірювальних систем. Вони призначені для геометричної та просторової інспекції виготовлених деталей і можуть застосовуватися з контактними (тактильними) або безконтактними (оптичними) датчиками. Машини цього класу використовуються як у лабораторних умовах, так і безпосередньо у виробничих цехах за умови відповідного температурного режиму (від 15 до 30°C за стандартом ISO 1 : 2002).

Стандартна лінійка портальних КВМ Hexagon Global характеризується повторюваністю вимірювань на рівні 1,3–1,5 мкм. Такої точності достатньо для вирішення переважної більшості задач машинобудівного виробництва. Діапазони вимірювання машин цього класу: по осі X — до 1,5 м, по осі Y — до 4 м, по осі Z — до 2 м. В Україні встановлено машини, зокрема, на підприємствах ДП «Антонов» та ін.

Переваги портальних КВМ: універсальне застосування; гнучкість у виборі технологій вимірювання та типів датчиків; висока швидкість аналізу (від кількох хвилин до кількох десятків хвилин залежно від складності деталі); можливість автоматичної зміни вимірювального інструменту за допомогою магазину.

Цехові КВМ. Цехові КВМ призначені для встановлення безпосередньо в умовах виробничого цеху поруч з технологічним обладнанням. Їх основна відмінність від лабораторних машин — можливість роботи в ширшому температурному діапазоні та стійкість до вібрацій і промислового запилення. Характерним представником цього класу є машина TIGO SF, яка, на відміну від лабораторних систем з пневматичними підшипниками, використовує кульково-гвинтові передачі та енкодера, що усуває потребу у стисненому повітрі.

Ключові переваги цехових КВМ: скорочення «логістичного плеча» між верстатом і засобом контролю; оперативне отримання зворотного зв'язку для коригування технологічного процесу; легка інтеграція в автоматизовані гнучкі виробничі лінії; можливість автоматичного коригування припусків на обробку за результатами вимірювань. Широке використання цехових КВМ характерне для провідних європейських виробників, де вони є невід'ємним елементом цифрових виробничих систем.

Ультрапрецизійні КВМ. Ультрапрецизійні машини призначені для вимірювань, де стандартна точність є недостатньою. Клас точності таких машин — субмікронний. Наприклад, машина серії Leitz PMM-C має точність  $0,28 + L/1000$  мкм, що дозволяє вимірювати деталь метрового розміру з похибкою не більше 1,3 мкм. Для порівняння: товщина людського волосся становить 30–50 мкм, а відбиток пальця — близько 5 мкм.

Ультрапрецизійні машини потребують строго контрольованого лабораторного середовища зі стабільним температурним режимом. Їх застосовують: для вимірювання підшипників і різального інструменту; як референтні (еталонні) машини для перевірки стандартних КВМ підприємства; у розробці нових моделей вимірювальних машин на виробничих підприємствах Hexagon.

Мостові та горизонтальні КВМ. Мостові (великогабаритні) КВМ є продовженням лінійки портальних машин для вимірювання великих виробів. Конструктивно вони виконані у вигляді мостового крана з траверсою, що переміщається вздовж двох колон. Це дає змогу встановлювати важкі деталі безпосередньо на підлогу без обмежень по масі. Максимальний розмір робочої зони таких машин може досягати 20 м (рекорд — машина в Китаї для потреб енергетики). В Україні найбільша встановлена мостова машина має зону вимірювання  $2,5 \times 5 \times 2,3$  м і розташована на Новокраматорському машинобудівному заводі (НКМЗ).

Горизонтальні (стоечні) КВМ спеціалізовані для вимірювання кузовних елементів автомобілів. Вони можуть виконуватися з однією або двома стойками (остання конфігурація передбачає синхронну роботу двох машин). Точність таких систем становить 5–10 мкм, що відповідає вимогам автомобільного виробництва до контролю штампованих елементів кузова.

Мультисенсорні КВМ. Мультисенсорні КВМ (серія Optiv) поєднують контактний і безконтактний методи вимірювання в одній машині. Вони є, по суті, мікроскопами нового покоління, де замість ока людини використовуються цифрові камери та оптичні системи з автоматичним фокусуванням. Точність оптичних вимірювань — до 0,1 мкм з роздільною здатністю, точність по осі Z (за рахунок конфокального фокусування) — близько 0,01 мм.

Типові галузі застосування мультисенсорних КВМ: радіоелектроніка та мікроелектроніка (контроль розташування елементів на друкованих платах); точна механіка (вимірювання важкодоступних малих розмірів); виробництво мобільних пристроїв та корпусів складної геометрії. Мінімальний діаметр вимірювального щупа для тактильного контакту — 0,3 мм, що відповідає деталям дуже малих розмірів.

#### **Датчики та вимірювальні головки для стаціонарних КВМ.**

Стаціонарна КВМ є багатокоординатною системою. З урахуванням усіх ступенів свободи: трьох лінійних осей машини (X, Y, Z), двох осей поворотної головки (A і B), шести осей тактильного скануючого датчика та однієї осі поворотного столу — загальна кількість осей досягає 13. Це забезпечує унікальну гнучкість у досягненні будь-яких поверхонь деталі.

Тактильні датчики. Touch Trigger Probe (ТТР) — класичний дотиковий датчик — є тривимірним високоточним мікровимикачем, який реєструє координати точки в момент торкання кульки щупа до поверхні деталі. Продуктивність такого методу — близько 1 точки на секунду. Незважаючи на обмежену продуктивність, ТТР забезпечує мікронну точність і широко застосовується для відповідальних вимірювань.

Скануючі (аналогові) датчики — сучасніший клас тактильних засобів. Вони дозволяють виконувати як поточкові вимірювання, так і сканування поверхні у безвідривному режимі (сплайнове сканування). Завдяки безперервному ковзанню по поверхні продуктивність значно перевищує можливості ТТР. Саме скануючі датчики є основним типом, який постачається разом із сучасними КВМ Hexagon. Особливої уваги заслуговує застосування голкоподібних щупів для вимірювання різьби і різбових калібрів безпосередньо на КВМ, що дозволяє уникнути необхідності в окремих контурографах.

Безконтактні оптичні датчики. Лазерний рядковий сканер HP-L 10.10 є найбільш сучасним безконтактним датчиком для стаціонарних КВМ. Він дозволяє одночасно знімати велику кількість точок (рядковий метод), забезпечуючи точність 5–8 мкм. Це є достатнім для аналізу складних пресформ, литих і штампованих деталей. Попередня модель HP-L 10.6 продемонструвала 70% скорочення часу інспекції порівняно з тактильним методом. Нова модель HPL 10.10 за даними виробника є в 7 разів швидшою.

Конфокальний датчик (субмікронна точність) застосовується для вимірювань у режимі мультисенсорних систем, зокрема для контролю координат елементів друкованих плат. Оптичний датчик структурованого світла може монтуватися на порталну машину, перетворюючи її у мультисенсорну систему для задач, де потрібно поєднати тактильне і оптичне вимірювання.

#### **Портативні вимірювальні системи.**

Вимірювальні руки. Портативні вимірювальні руки (FARO, Romer та ін. у портфоліо Hexagon) є шести- або семиосьовими пристроями, які «несуть» вимірювальну машину до деталі, а не навпаки. Вони ідеально підходять для вимірювання великогабаритних деталей там, де транспортування виробу до лабораторії неможливе або недоцільне. Метафора для розуміння точності: якщо КВМ — це «3D мікрометр», то вимірювальна рука — «3D штангенциркуль».

Технічні характеристики вимірювальних рук: діапазон вимірювання — від 1,2 м до 4,5 м радіусу; максимальна точність (найменша рука) — 8 мкм при тактильному вимірюванні; точність при лазерному скануванні — 2–5 соток міліметра; вартість найкращих варіантів комплектації з лазерним сканером — близько 150 000 євро. Захист від виробничого середовища досягає рівня IP54, що дозволяє використовувати руки безпосередньо на верстатах у зоні охолоджувальних рідин.

Важливою перевагою є можливість вимірювання деталей безпосередньо на верстаті без зйому заготовки. Перевстановлення деталі неминує вносить похибки в подальшу обробку, тому міжопераційний контроль на верстаті дозволяє суттєво підвищити якість виготовлення складних деталей. Найновіший лазерний сканер AS1 (Absolute Scanner AS1) для вимірювальних рук вирішив традиційну проблему відзеркалення від металевих поверхонь: адаптивне керування інтенсивністю лазера здійснюється не один раз на сесію, а для кожної рядкової смуги сканування окремо.

Лазерні трекери. Лазерні трекери — координатно-вимірювальні машини, що здійснюють прецизійне стеження за положенням оптичної призми (відбивача) або безпосередньо скануванням поверхні. Вони є ключовим інструментом для великих об'єктів в енергетиці, суднобудуванні та авіабудуванні.

Новітня модель ATS600 реалізує безпосереднє лазерне сканування поверхні з точністю 0,3 мм при великих відстанях, що відкриває нові можливості для авіабудування та суднобудування. У травні 2025 року Hexagon випустив нову систему Leica Absolute Tracker ATS800, яка поєднує точність лазерного трекера з можливостями прямого безконтактного сканування і оптимізована для роботи в складі автономних мобільних роботів (AMR). На великих промислових підприємствах України (НКМЗ, Турбоатом) трекери використовуються одночасно з вимірювальними руками для виконання різних задач — прив'язки, розмічення заготовок та контролю точності складання.

Сканери структурованого світла. Сканери структурованого світла є одним з найновіших напрямків у портативній метрології. В світі лише близько п'яти виробників успішно застосовують цю технологію. Принцип роботи — проектування спеціального оптичного малюнка зі зміною фаз на поверхню деталі та аналіз деформації цього малюнка для відновлення тривимірної геометрії.

Найновіша модель Hexagon SmartScan VR800 є першим у світі оптичним сканером із запатентованим моторизованим оптичним зумом і камерами 20 МП, що дозволяє програмно змінювати поле зору без фізичної заміни об'єктивів. Сканер використовує четверту вісь (поворотний стіл) для сканування деталі з різних ракурсів. Погрешність форми (Probing Size error) VR800 складає від 3 до 8 мкм, однак глобальна масштабна погрешність відстані (Sphere Spacing Error, SSE) у робочому об'ємі становить від 9 до 28 мкм залежно від конфігурації. Це робить сканери структурованого світла привабливими для авіабудування (контроль лопаток турбін, пресформ) та точного машинобудування.

Системи структурованого світла легко автоматизуються шляхом встановлення сканера на промисловий робот або кобот. В Україні перші такі системи з'явилися близько 7 років тому. Їх основні замовники — підприємства авіаційної промисловості і точного машинобудування.

Фотограметричні системи та ручні сканери. Фотограметричні системи (не більше 10–12 років на ринку) засновані на алгоритмах фотограметрії та використовують спеціальні маркери для вимірювання великогабаритних об'єктів. Ці системи стали можливими лише після того, як обчислювальна потужність сучасних комп'ютерів забезпечила аналіз даних у режимі реального часу.

Ручні метрологічні сканери (серія Leica RTC360, HandySCAN та ін. у портфоліо Hexagon) дозволяють використовувати фотограметричні алгоритми для вимірювання великогабаритних об'єктів у «вільному» режимі. Вони застосовуються при відсутності чіткої прив'язки до системи координат, коли оператор обходить виріб і збирає хмару точок з різних позицій.

Особливу позицію займає запатентована система інспекції труб, аналогів якій немає у жодного іншого виробника. Вона дозволяє контролювати розміри і корекцію трубогібів при виготовленні труб складної просторової конфігурації або стрижнів прямокутного перерізу для генераторів і турбін.

#### **Зворотній інженіринг як метод відтворення конструкторської документації.**

Зворотній інженіринг (reverse engineering) — це процес отримання математичної моделі або конструкторської документації на підставі наявного фізичного зразка деталі, механізму або виробу. На відміну від інспекції (перевірки відповідності виробу моделі), це зворотній процес — від реального об'єкта до його цифрового опису. Зворотній інженіринг набуває особливого значення в умовах необхідності відновлення виробництва деталей за відсутності оригінальної документації.

Процес зворотного інженірингу включає кілька обов'язкових етапів: підготовку деталі (очищення від забруднень, нагару); сканування (оптичне або тактильне) для отримання «хмари точок»; моделювання — перетворення хмари точок у твердотільну CAD-модель; конструкторська обробка — призначення номінальних розмірів, допусків, посадок та матеріалів кваліфікованим конструктором. Важливо підкреслити, що вимірювальна система надає тільки реальну геометрію зразка; призначення допусків і посадок залишається компетенцією конструктора і технолога.

Для моделювання компанія «Кода» використовує програму Geomagic Design X — спеціалізований інструмент зворотного інженірингу, що дозволяє автоматизовано конвертувати хмару точок у параметричну твердотільну модель, придатну для подальшого редагування в CAD-системах (CATIA, SolidWorks, NX тощо). Для інспекції застосовується також програмний пакет PolyWorks з модулями IMInspect та IMAlign. Обидва програмні засоби постачаються та супроводжуються компанією «Кода».

Практичний досвід компанії свідчить, що більшість замовників перших систем зворотного інженірингу спочатку замовляють послуги сканування, а вже після нагромадження практичного досвіду переходять до придбання власного обладнання.

#### **Критерії вибору вимірювального обладнання.**

Вибір класу вимірювальної системи визначається сукупністю факторів: розміром вимірюваних деталей; необхідною точністю вимірювань; умовами виробничого середовища; необхідністю мобільності; вимогами до продуктивності; бюджетом інвестицій.

Ключовим метрологічним принципом при виборі засобу вимірювання є правило Test Accuracy Ratio (TAR): точність інструменту має перевищувати допуск вимірюваного параметра не менше ніж у 5 разів (рекомендована норма для КВМ-класу) або в 10 разів (для ручних інструментів). Значення TAR у 2–3 рази є абсолютним нижнім допустимим порогом, при якому метрологічна достовірність починає знижуватись. Тобто для контролю розміру з допуском 0,1 мм необхідна машина з точністю не гіршою за 0,003–0,005 мм.

Орієнтовні ціни на основні класи систем: стандартна портальна КВМ — від 50 000 до 200 000 євро залежно від розміру і комплектації; вимірювальна рука з лазерним сканером — близько 150 000 євро; мостова КВМ великого розміру — кілька сотень тисяч євро; лазерний трекер — зіставний з вартістю вимірювальної руки або вищий.

Для умов виробництва, де основними задачами є зворотній інженіринг і контроль деталей із допусками 2–5 соток, оптимальним вибором є вимірювальна рука або настільний 3D-сканер типу Spider. Якщо ж на

підприємстві виробляється відповідальна продукція з мікронними допусками (підшипники, пресформи, прецизійні деталі), необхідна стаціонарна КВМ.

### **Тенденції розвитку індустріальної метрології.**

Аналіз представленого портфоліо дозволяє виокремити такі основні тенденції розвитку галузі.

- Інтеграція вимірювань у виробничий процес. Зміщення контролю якості від лабораторного до цехового — використання цехових КВМ і вимірювальних рук безпосередньо поруч з обробним обладнанням.
- Конвергенція контактних і безконтактних технологій. Мультисенсорні системи та комбіновані сканери усувають протиставлення тактильних і оптичних методів, забезпечуючи оптимальне поєднання точності й продуктивності.
- Роботизація вимірювальних процесів. Встановлення сканерів структурованого світла на роботи і коботи відкриває шлях до повністю автоматизованого вимірювання в складі гнучких виробничих систем.
- Зростання ролі програмного забезпечення. Виробники все активніше розвивають екосистеми програмних платформ (платформа Hexagon), що об'єднують управління обладнанням, обробку даних, навчання операторів та аналітику виробничих процесів.
- Збільшення циклу виставок. Провідні виробники перейшли від щорічної до дворічної участі у виставках (Control, Штутгарт) для накопичення значимих інновацій між показами, що відображає ускладнення та подорожчання розробки нового покоління систем.

### **Висновки.**

Сучасні системи індустріальної метрології охоплюють широкий спектр класів обладнання — від субмікронних ультрапрецизійних лабораторних машин до мобільних роботизованих сканерів, — що дозволяє вирішувати практично будь-яку задачу вимірювання в машинобудуванні.

Ключовим критерієм вибору засобу вимірювань є відповідність точності інструменту допускам вимірюваних параметрів (2–3-кратний запас для КВМ-класу), а також відповідність умовам виробничого середовища і вимогам до мобільності.

Зворотній інжиніринг є важливим, але багатоетапним процесом, що вимагає не лише вимірювального обладнання та програмного забезпечення, а й кваліфікованих конструкторів і технологів, здатних інтерпретувати отримані геометричні дані та призначити допуски з урахуванням функціонального призначення деталі.

Провідна тенденція галузі — інтеграція вимірювань безпосередньо у виробничий процес із автоматизованою передачею даних на технологічне обладнання. Це суттєво скорочує цикл обробки та підвищує стабільність якості продукції.

Для підприємств України, що здійснюють або планують впровадження сучасних засобів метрологічного контролю, рекомендується розпочинати з послуг вимірювання — це дозволяє сформувати реалістичне уявлення про задачі та потреби до придбання власного обладнання.

### **Список літератури:**

1. Hexagon Manufacturing Intelligence. Portfolio of Metrology Systems [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.hexagon.com> — Дата звернення: квітень 2025.
2. UA ТОВ Фірма «КОДА» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.koda.ua/ukr/> — Дата звернення: квітень 2025.
3. De Chiffre L., Quagliotti D. The Role of Geometrical Metrology in Manufacturing—An Update // 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor) 2024.
4. Stojadinovic S. M., Majstorovic V. D., Gaška A., Śladek J., Durakbasa N. M. Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0 // Applied Sciences, 11(18), 8411. 2021.
5. Debnath B., Pourfarash Z., Ghorpade B., Raman S. Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review // Metrology, 5(4), 66. 2025.
6. Magdziak M. Estimating Time of Coordinate Measurements Based on the Adopted Measurement Strategy // Sensors, 22(19), 7310. 2022.
7. Козловський В. В., Шкварницька Т. Ю. Автоматизовані системи контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних технологій // Системні технології № 2 (157) 2025. с. 120-127. ISSN 1562-9945.
8. Gabštur P., Kočíško M., Kaščák J., Pollák M. Methodology for Verification of Geometrically Complex Components Through Reverse Engineering // Applied Sciences, 15(7), 3963. 2025.
9. Phillips S., Shakarji C., Balsamo A., Krystek M., Morse E. The 2016 Revision of ISO 1 - Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 121. 2016. с. 503.
10. Wang W., et al. On-site calibration method of the AACMM based on a high-precision CNC machine tool // Measurement Science and Technology 2022.
11. Пермяков О. А., Яковенко І. Е., Калініченко В. А., Скіба О. С., Юзковіч П. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2023.

### **References (transliterated)**

1. Hexagon Manufacturing Intelligence. Portfolio of Metrology Systems [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.hexagon.com> — Date of access: April 2025.
2. UA LLC Firm "KODA" [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.koda.ua/ukr/> — Application date: April 2025.
3. De Chiffre L., Quagliotti D. The Role of Geometrical Metrology in Manufacturing—An Update // 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor) 2024.

4. Stojadinovic S. M., Majstorovic V. D., Gaška A., Sładek J., Durakbasa N. M. Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0 // *Applied Sciences*, 11(18), 8411. 2021.
5. Debnath B., Pourfarash Z., Ghorpade B., Raman S. Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review // *Metrology*, 5(4), 66. 2025.
6. Magdziak M. Estimating Time of Coordinate Measurements Based on the Adopted Measurement Strategy // *Sensors*, 22(19), 7310. 2022.
7. Kozlovsky V. V., Shkvarnytska T. Yu. Automated systems for controlling geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies // *System Technologies No. 2 (157) 2025*. pp. 120-127. ISSN 1562-9945.
8. Gabštur P., Kočíško M., Kaščák J., Pollák M. Methodology for Verification of Geometrically Complex Components Through Reverse Engineering // *Applied Sciences*, 15(7), 3963. 2025.
9. Phillips S., Shakarji C., Balsamo A., Krystek M., Morse E. The 2016 Revision of ISO 1 - Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 121. 2016. p. 503.
10. Wang W., et al. On-site calibration method of the AACMM based on a high-precision CNC machine tool // *Measurement Science and Technology* 2022.
11. Permyakov O. A., Yakovenko I. E., Kalinichenko V. A., Skiba O. S., Yuzkovich P. Reverse engineering and implementation of modern methods and means of control operations // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*. 2023.

*Надійшла (received) 03.03.2025*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Воропаєв Мирослав Вячеславович (Voropaiev Myroslav)** - аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Myroslav.Voropaiev@mit.khpi.edu.ua, ORCID:0009-0009-6540-7999

**Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena)** - канд. техн. наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Olena.V.Naboka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3997-5481

*МИРОНЕНКО С. О.***ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ФОРМИ ЗУБІВ НЕЕВОЛЬВЕНТНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ**

У статті обґрунтовано актуальність дослідження зубчастих передач зі складним неевольвентним профілем бічних поверхонь зубів, які в ряді областей застосування мають переваги перед евольвентними зубчастими передачами і позбавлені деяких їх недоліків, пов'язаних з якісними показниками. Показано, що для отримання сполучених поверхонь зубів двох неевольвентних зубчастих коліс можуть бути використані дві інструментальні рейки з профілями бічних поверхонь зубів, зворотними по відношенню один до одного. Як нелінійний профіль бічної поверхні зуба інструментальної рейки розглядається деяка ділянка однієї з модельованих плоских кінематичних кривих. Дано опис програми, яка дозволяє розраховувати геометричні характеристики формоутворених профілів коліс зубчастої пари, візуалізувати процес формоутворення, а також визначати якісні показники зубчастого зачеплення. Тим самим створено передумови для вибору з отриманого в результаті геометричного моделювання поля кривих таких профілів зубів інструментів, які б забезпечували найбільш раціональне поєднання профілів зубів оброблених ними зубчастих коліс і необхідні якісні показники зубчастого зачеплення. Представлені результати дослідження коефіцієнта форми зубів зубчастої передачі при виборі форми профілів зубів. Проведено серії чисельних експериментів для зубчастих зачеплень, утворених парами інструментальних рейок з різними профілями бічних поверхонь зубів – прямолінійними, опуклим і увігнутим, а також увігнуто-опуклими. Показано, що неевольвентні зубчасті зачеплення можуть мати менші коефіцієнти форми зубів в порівнянні з евольвентними зачепленнями. Найбільш доцільним представляється варіант рейок з увігнутим і увігнуто-опуклим профілями зубів, що забезпечує найкращі значення якісних показників зачеплення.

**Ключові слова:** неевольвентне зубчасте зачеплення, формоутворення зубчастих коліс, поверхні, що сполучаються, інструментальна рейка, профіль зуба, плоска кінематична крива, якісні показники зубчастого зачеплення.

**MIRONENKO S.****RESEARCH OF TOOTH SHAPE COEFFICIENTS OF NON-EVOLVENT GEARS**

The article substantiates the relevance of the study of gears with a complex non-evolvent profile of the side surfaces of the teeth, which in some applications have advantages over evolvent gears and are devoid of some of their drawbacks associated with quality indicators. It is shown that to obtain the mating surfaces of the teeth of two non-evolvent gears, two tool rails can be used with the profiles of the side surfaces of the teeth opposite to each other. As a nonlinear profile of the tooth lateral surface of the tool rail, some part of one of the simulated flat kinematic curves is considered. A description of the program is given, which allows you to calculate the geometric characteristics of the shaped profiles of the gear pair wheels, visualize the shaping process, and also determine the quality indicators of the gearing. Thus, the prerequisites were created for choosing from the resulting geometric modeling of the curve field of such tooth profiles of the tools, which would provide the most rational combination of the tooth profiles of the gears processed by them and the required quality parameters of the gear teeth. The results of the study of the tooth shape coefficients between the teeth of a gear when choosing the shape of the tooth profiles are presented. A series of numerical experiments for gearing, formed by pairs of tool rails with different profiles of the side surfaces of the teeth – straight, convex and concave, as well as concave-convex – were performed. It is shown that non-evolvent gearing can have smaller tooth shape coefficients compared to evolvent gearing. The most preferable is the variant of the rails with concave and concave-convex tooth profiles, which provides the best values of quality indicators of the engagement.

**Keywords:** non-evolvent gearing, shaping of gears, mating surfaces, tool rail, tooth profile, flat kinematic curve, quality indicators of gearing.

**Вступ.**

Зубчасті передачі, що використовуються у сучасному машинобудуванні, повинні забезпечувати передачу великих обертаючих моментів, бути точними та швидкохідними, плавними та безшумними. Разом з тим зубчасті зачеплення повинні характеризуватися високою працездатністю: надійністю, довговічністю, безвідмовністю, ремонтпридатністю.

Найважливіші експлуатаційні властивості зубчастих передач (плавність зачеплення, міцність та знос зубів коліс) оцінюються за низкою якісних показників працездатності зачеплення. Коефіцієнт перекриття дозволяє оцінити безперервність зубчастого зачеплення, плавність та безшумність роботи передачі. Коефіцієнт тиску між зубами характеризує силову взаємодію зубчастих коліс, їхню контактну міцність. Коефіцієнт ковзання зубів враховує вплив геометричних та кінематичних факторів на інтенсивність зносу профілів зубів, є показником їхньої зносостійкості. Коефіцієнт форми зуба характеризує згинальну міцність зубів.

Зубчасті передачі з евольвентним профілем бічних поверхонь зубів є найбільш поширеними механічними передачами, які застосовуються в машинобудуванні. Передачі, складені з таких коліс, відрізняються рядом переваг, однак мають при цьому і цілий ряд недоліків, що пов'язані з їх експлуатаційними властивостями. Тому актуальною задачею є дослідження зубчастих передач зі складним неевольвентним профілем бічних поверхонь зубів, які в ряді областей застосування при вдалому виборі поєднання профілів зубів мають переваги перед евольвентними передачами за якісними показниками.

**Мета дослідження.**

Дослідження спрямовані на комплексний аналіз якісних показників неевольвентних зубчастих зачеплень, зокрема розробку математичної моделі розрахунку коефіцієнтів форми зубів зубчастої передачі, з метою вибору з отриманого в результаті геометричного моделювання поля кривих таких профілів зубів інструментів, які б забезпечували найбільш раціональне поєднання профілів зубів оброблених ними зубчастих коліс і необхідні якісні показники зубчастого зачеплення.

### 3. Викладення основного матеріалу та результати.

У ряді попередніх наукових досліджень було розроблено геометричну модель кінематичної кривої як потенційного профілю бічної поверхні зуба зуборізного інструменту та математичну модель розрахунку профілю зуба зуборізного інструменту для обробки невольвентних зубчастих коліс [1, 2, 3, 4]; розроблено методику геометричного аналізу процесу формування поверхонь обкатними зуборізними інструментами та методику отримання профілів сполучених поверхонь зубів невольвентних зубчастих коліс як огинаючих поверхонь зубів інструментів [2, 3, 4, 5]; розроблено математичну модель розрахунку профілю огинаючої поверхні зуба зубчастого колеса, оброблюваного за методом обкатки, та математичну модель розрахунку коефіцієнтів тиску між зубами та перекриття зубчастої передачі з метою спрямованого формування заданих параметрів її якісних показників [2, 5, 6, 7].

У продовженні та розвитку цих досліджень для подальшої можливості комплексного аналізу якісних показників невольвентних зубчастих зачеплень вирішується задача математичного моделювання розрахунку коефіцієнтів форми зубів зубчастої передачі, складеної з невольвентних зубчастих коліс.

Ведуча та ведена ланки зубчастих механізмів утворюють у місці контакту вищу кінематичну пару. Для забезпечення передачі руху від ведучої ланки до веденої в цій парі повинні виконуватись геометричні та кінематичні умови [8-10]. Відповідно до геометричної умови, у точці контакту профілів поверхні ланок повинні мати загальну нормаль. У вищих парах елементами торкання ланок є лінії або точки, тому питомий тиск у них дуже великий, що викликає підвищений знос ланок. Сили, що діють на профілі поверхонь ланок у точці їх контакту, рівні за модулем, силова взаємодія спрямована по загальній нормалі до профілів.

Розглянемо плоску задачу торкання поверхонь зубчастих коліс 1 і 2. Поверхні зубчастих коліс зв'яжемо з реперами  $x_1y_1z_1$  і  $x_2y_2z_2$ . Вихідне положення реперів, параметри рухів  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , параметри їх швидкостей  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , а також центроїди коліс представлено на рис. 1. У нормальному перерізі центроїди коліс є окружностями з радіусами  $r_1$  і  $r_2$ . На рисунку показано два послідовні моменти торкання профілів зубів у точках  $P$  і  $M$ . Ці точки лежать на лінії зачеплення, точка  $P$  є миттєвим полюсом зачеплення. У випадку евольвентного зачеплення профілів зубів лінія зачеплення є прямою. У загальному випадку, коли профілі мають довільну невольвентну форму, лінія зачеплення є кривою, що проходить через полюс зачеплення. Точка торкання профілів  $M$  відповідає крайній точці лінії зачеплення та розташована на вершині зуба зубчастого колеса 1.

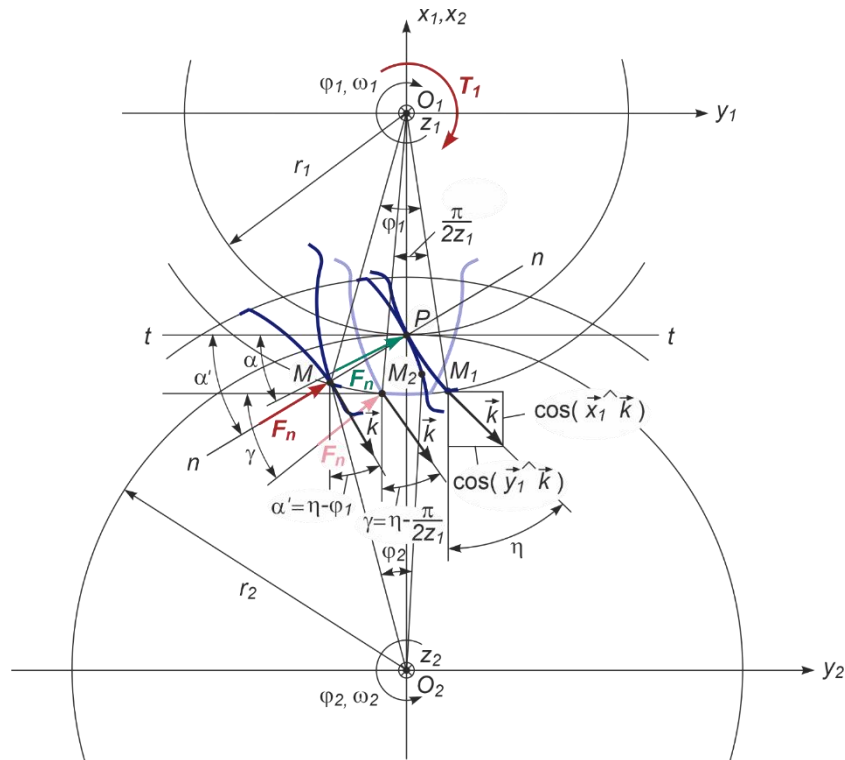


Рис. 1 - До розрахунку коефіцієнтів форми зубів зубчастої передачі

Лінія  $t-t$  – загальна дотична до центроїд у точці  $P$ . Пряма  $n-n$ , що проходить через полюс зачеплення, є загальною нормаллю, а пряма  $k-k$  – загальною дотичною до профілів у точці торкання  $M$ .

Профільна нормаль  $n-n$  та дотична до центроїд  $t-t$  утворюють між собою кут  $\alpha'$ . У загальному випадку, коли профілі зубів неевольвентні, значення кута  $\alpha'$  різні для різних точок торкання профілів і не збігаються зі значенням кута  $\alpha$ , що відповідає торканню профілів у полюсі зачеплення  $P$ .

Вихідне положення профілів відповідає моменту торкання профілів зубів у точці  $P$  (рис. 1). У цей момент точка  $M$ , що належить одночасно профілям зубів двох зубчастих коліс в інший момент торкання, роздвоюється і на профілях зубів позначена точками  $M_1$  і  $M_2$ .

Найбільш небезпечним варіантом руйнування зубчастих коліс є злам зубів, що викликаний напруженнями згину. Розглянемо метод розрахунку зубчастих передач по напруженнях згину, заснований на положеннях опору матеріалів. При розрахунку приймають наступні припущення:

1) зусилля, що діє в зубчастому зачепленні, передається лише однією парою зубів (під час обкатки зубчастих коліс існують зони одно-парного і двох-парного зачеплення зубів, але переважно контактує одна пара зубів, крім того навіть в зоні двох-парного зачеплення внаслідок похибок виготовлення коліс та складання передачі може контактувати лише одна пара зубів; у випадку одно-парного контакту сили, прикладені до зубів коліс, будуть найбільшими і такий режим навантаження є найбільш небезпечним);

2) контакт зубів відбувається у крайній точці лінії зачеплення, тому навантаження прикладається до вершини зуба зубчастого колеса (в цьому випадку плече сили  $i$ , як наслідок, напруження згину будуть максимальними, що робить таке розташування навантаження найбільш небезпечним);

3) сила тертя в зачепленні мало впливає на величину напруження і тому не враховується;

4) зуб зубчастого колеса розглядається як навантажена зосередженою силою защемлена консольна балка прямокутного перерізу, що працює на згин та стиск.

Прикладемо крутний момент  $T_1$  до зубчастого колеса 1 за годинниковою стрілкою (рис. 1). Під дією крутного моменту зубчасте колесо 1 обертається і зуб колеса 1 тисне на зуб колеса 2. Між зубами діє нормальна сила. Контакт зубів і їх силова взаємодія у припущенні відсутності тертя між зубами відбуваються вздовж лінії зачеплення. Нормальна сила  $F_n$ , що діє на зуб колеса 1 з боку зуба колеса 2, спрямована по загальній нормалі до профілів зубів і контакт зубів відбувається в полюсі зачеплення.

У випадку розрахунку зубів на контактну міцність вважається, що нормальна сила  $F_n$  прикладена до точки профілю зуба колеса 1, яка контактує з профілем зуба колеса 2 в полюсі зачеплення  $P$  (на рисунку її дія показана зеленим кольором). Але у випадку розрахунку зубів на згин нормальна сила  $F_n$  прикладається до вершини зуба колеса 1 у точці  $M$  (на рисунку дія сили показана червоним кольором).

Зробимо поворот зображення зуба колеса 1 разом із прикладеною до нього у точці  $M$  силою  $F_n$  навколо центра центроїди колеса  $O_1$  так, щоб вісь симетрії зуба збіглася з лінією, що з'єднає центри центроїд коліс  $O_1$  і  $O_2$  (рис. 1). Це положення зуба будемо вважати вихідним для побудови схеми розрахунку зуба на згин.

Геометрична форма зуба значною мірою визначає його показники як згинальної, так і контактної міцності. Оцінка впливу геометрії зуба на згинальну міцність виконується за допомогою коефіцієнта форми зуба. Цей коефіцієнт визначається через параметри балки параболічного перерізу (балки рівного опору згину), яка вписується в профіль зуба зубчастого колеса таким чином, щоб вершина параболи розташовувалася в точці  $A$  перетину осі зуба і нормалі до профілю зуба у його вершині, а гілки торкалися профілю зуба в точках  $B$  і  $C$  на його основі, які визначають положення небезпечного перерізу зуба на згин (рис. 2), де  $F_n$  – нормальна сила, що діє на зуб;  $s$  – товщина зуба в небезпечному перерізі на основі зуба;  $l$  – висота від вершини параболи до основи зуба (плече згинальної сили).

Схему розрахунку зуба зубчастого колеса на згин представлено на рис. 3. Нормальну силу  $F_n$  перенесемо у напрямку нормалі  $n-n$  в точку, що лежить на осі зуба, і розкладемо на дві складові – окружну силу  $F_t$  і радіальну силу  $F_r$ . Їх можна визначити через нормальну силу  $F_n$  наступним чином:

$$\begin{aligned} F_t &= F_n \cos \gamma; \\ F_r &= F_n \sin \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\gamma$  – кут прикладання нормальної сили.

Зуб можна розглядати як консольну балку, яка навантажена двома силами  $F_t$  і  $F_r$  на вільному кінці (рис. 3). Під дією сили нормального стиску  $F_r$  консольна балка стискається, згідно з епюрою нормальної сили  $N$  ця сила однакова по висоті балки (тобто по висоті зуба). Сила  $F_t$  згинає балку, згідно з епюрою згинального моменту  $M$  внаслідок збільшення плеча сили момент сили зростає від вільного кінця балки до її закріплення і є максимальним в основі балки (тобто в основі зуба).

Визначимо напруження у небезпечному перерізі в основі зуба. Радіальна сила  $F_r$  викликає напруження стиску в основі зуба, а окружна сила  $F_t$  викликає момент, який створює напруження згину.

Побудуємо епюру напружень стиску в основі зуба. Він є рівномірним вздовж товщини зуба. Напруження стиску дорівнює відношенню стискаючої сили  $F_r$  до площі перерізу в основі зуба  $A$  :

$$\sigma_{cm} = \frac{F_r}{A}. \quad (2)$$

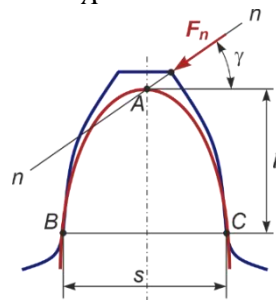


Рис. 2 – Профілі зуба зубчастого колеса та балки рівного опору згин.

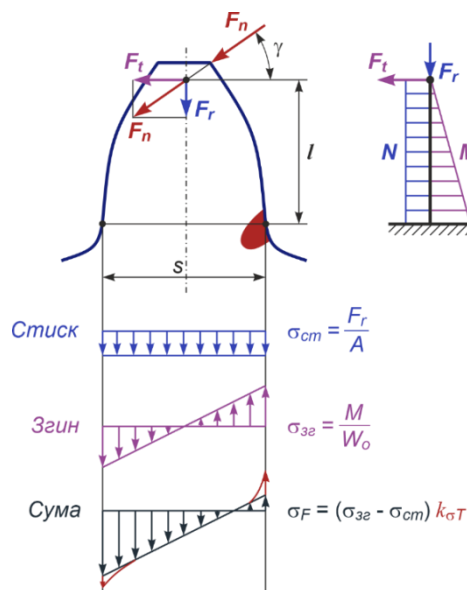


Рис. 3 – Схема розрахунку зуба зубчастого колеса на згин.

Побудуємо епюру напружень згину в основі зуба. Оскільки згинальний момент в даному випадку діє проти годинникової стрілки, у правій відносно осі симетрії частині профілю зуба буде розтяг, у лівій частині буде стиск. Напруження згину дорівнює відношенню згинального моменту у перерізі в основі зуба  $M$  до осьового моменту опору перерізу  $W_o$  :

$$\sigma_{zz} = \frac{M}{W_o}. \quad (3)$$

Сумарні напруження в основі зуба є сумою напружень стиску і напружень згину. Сумарні напруження в основі зуба у лівій стиснутій частині зуба будуть більші, ніж у правій розтягнутій частині (рис. 3), але напруження стиску є набагато безпечнішими з точки зору можливої поломки зуба, ніж напруження розтягу. Втомна тріщина, яка може з'явитися в основі зуба, у правій частині зуба буде розкриватися під дією моменту і призводити до зламу зуба, а в лівій частині буде закриватися. Тому за розрахункові приймають сумарні напруження на правій розтягнутій частині зуба і формула для їх обчислення приймає вигляд:

$$\sigma_F = \sigma_{zz} - \sigma_{cm}. \quad (4)$$

Крім того, в зоні перехідної кривої профілю (галтелі) в ніжці зуба спостерігається концентрація напруження (на рис. 3 зону концентрації напруження виділено червоним кольором). Для врахування цього на епюрі сумарних напружень вказується збільшення рівня напружень у крайніх ділянках епюри. У формулі для сумарних напружень в основі зуба наявність концентрації напруження враховується за допомогою коефіцієнта  $k_{\sigma T}$ , який називається теоретичним коефіцієнтом концентрації напруження:

$$\sigma_F = (\sigma_{zz} - \sigma_{cm}) k_{\sigma T}. \quad (5)$$

В основі зуба лежить прямокутник шириною  $s$  та довжиною  $b$  (ширину зуба позначимо як  $b$ ) (рис. 4). В ідеалі, якщо б зуб був ідеальної форми, вали не деформувалися, а підшипники були абсолютно жорсткими, нормальна рівнодійна сила  $F_n$  (реакція взаємодії зубів) була би прикладена посередині зуба (рис. 4, а), але в дійсності внаслідок деформацій валів та похибок виготовлення зубчатого зачеплення рівнодійна сила буде зміщуватися на край зуба (рис. 4, б), злам зуба буде відбуватись не в його основі, а з одного боку зуба по деякій похилій площині, тобто по площині з мінімальним моментом опору.

З урахуванням того, що площа прямокутного перерізу в основі зуба  $A = bs$ , згинальний момент у перерізі  $M = F_l l$ , а осьовий момент опору перерізу  $W_o = \frac{bs^2}{6}$ , використовуючи вирази (1), перепишемо формули (2) і (3) відповідно до ідеалізованої схеми рівномірного розподілу навантаження наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_{cm} &= \frac{F_r}{bs} = \frac{F_n \sin \gamma}{bs}; \\ \sigma_{ze} &= \frac{6F_l l}{bs^2} = \frac{6F_n l \cos \gamma}{bs^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

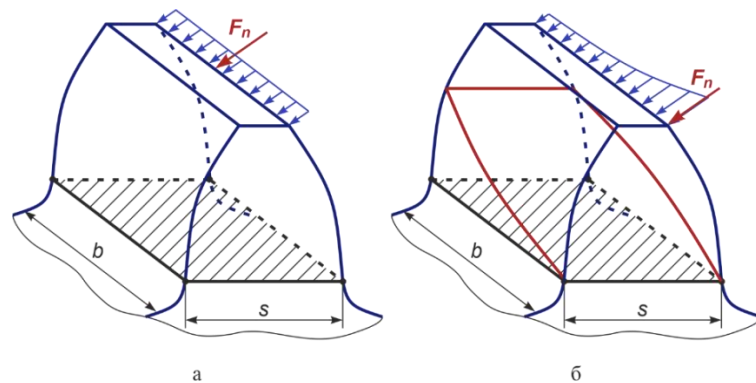


Рис. 4 – Розподіл навантаження, що відповідає напруженню згину, по ширині зуба зубчатого колеса: а – ідеалізована схема розподілу навантаження; б – реальна схема розподілу навантаження

Нерівномірність розподілу навантаження по ширині зуба і відповідно збільшення напружень в одній частині зуба враховується коефіцієнтом  $K_{F\beta}$ . Крім того, в процесі роботи зубчастих передач внаслідок зазорів, вібрацій і неточностей виготовлення один зуб може входити в зачеплення з іншим з ударом, внаслідок чого напруження динамічно збільшуються. Удар зубів при вході в зачеплення враховується динамічним коефіцієнтом  $K_{Fv}$ .

З урахуванням цього запишемо формули для обчислення напружень стиску і згину відповідно до реальної схеми нерівномірного розподілу навантаження:

$$\begin{aligned} \sigma_{cm} &= \frac{F_n \sin \gamma}{bs} K_{F\beta} K_{Fv}; \\ \sigma_{ze} &= \frac{6F_n l \cos \gamma}{bs^2} K_{F\beta} K_{Fv}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тоді формула (5) для обчислення сумарних напружень в основі зуба прийме вигляд:

$$\sigma_F = \left( \frac{6F_n l \cos \gamma}{bs^2} - \frac{F_n \sin \gamma}{bs} \right) k_{\sigma T} K_{F\beta} K_{Fv}. \quad (8)$$

Оскільки геометричні параметри зуба пропорційні модулю зачеплення  $m$ , виразимо параметри профілю зуба  $l$  і  $s$  у частках модуля:

$$l = l'm; \quad s = s'm, \quad (9)$$

де  $l'$  і  $s'$  – коефіцієнти, що враховують форму зуба.

В такому випадку

$$\sigma_F = \frac{F_n}{b} \left( \frac{6l'm \cos \gamma}{(s'm)^2} - \frac{\sin \gamma}{s'm} \right) k_{\sigma T} K_{F\beta} K_{Fv}. \quad (10)$$

Відповідно до виразу (1) нормальна сила  $F_n$ , що прикладена до вершини зуба, виражається через окружну силу  $F_t$  наступним чином:

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \gamma}. \quad (11)$$

Замінімо цю силу нормальною силою  $F_n$ , що прикладена до точки профілю зуба, яка контактує з профілем зуба іншого колеса в полюсі зачеплення  $P$  (рис. 1), і яку можна зв'язати з силовими параметрами передачі:

$$F_n = \frac{F_{tP}}{\cos \alpha}, \quad (12)$$

де  $F_{tP}$  – окружна складова нормальної сили, що зв'язана з крутним моментом  $T_1$  залежністю:

$$F_{tP} = \frac{T_1}{r_1} = \frac{2T_1}{d_1} = \frac{2T_1}{mz_1}. \quad (13)$$

В результаті отримаємо остаточну формулу для визначення сумарних напружень в основі зуба:

$$\sigma_F = \frac{F_{tP}}{bm \cos \alpha} \left( \frac{6l' \cos \gamma}{s'^2} - \frac{\sin \gamma}{s'} \right) k_{\sigma T} K_{F\beta} K_{Fv}. \quad (14)$$

При спрощеному обчисленні напружень в основі зуба стискаюча дія радіальної складової нормальної сили  $F_r$  мало впливає на величину напруження і тому може не враховуватися, тобто в формулі (14) складова, що віднімається у дужках, може бути опущена.

Значення коефіцієнтів  $k_{\sigma T}$ ,  $K_{F\beta}$  і  $K_{Fv}$  вибираються з відповідних таблиць або графіків.

У формулі (14) параметр  $F_{tP}$  залежать тільки від силових характеристик передачі,  $b$  і  $m$  – відомі параметри з виготовлення зубчастого колеса, коефіцієнти  $K_{F\beta}$  і  $K_{Fv}$  залежать від деформації і швидкості обертання валів. Інші параметри, які визначаються тільки геометрією зуба зубчастого колеса, виділяються і позначаються як  $Y_F$  – коефіцієнт форми зуба:

$$Y_F = \frac{1}{\cos \alpha} \left( \frac{6l' \cos \gamma}{s'^2} - \frac{\sin \gamma}{s'} \right) k_{\sigma T}. \quad (15)$$

Таким чином, умова згинальної міцності набуває наступного вигляду і є функцією окружної сили і коефіцієнтів, які її коректують:

$$\sigma_F = \frac{F_{tP} K_{F\beta} K_{Fv}}{bm} Y_F \leq [\sigma]_F, \quad (16)$$

де  $[\sigma]_F$  – допустиме напруження згину.

Коефіцієнт форми зуба  $Y_F$  в першу чергу залежить від кількості зубів зубчастого колеса, що впливає на форму зуба. При збільшенні кількості зубів зменшується кривизна ніжки зуба і збільшується її ширина  $s$ , це призводить до збільшення осьового моменту опору перерізу в основі зуба, що залежить від квадрату ширини зуба, і зменшенню коефіцієнта форми зуба. Тому більш міцним на згин буде зуб з більшою кількістю зубів.

Визначимо фізичний зміст коефіцієнта форми зуба. Нехай окружна сила  $F_{tP} = 1$  Н, модуль зуба  $m = 1$  мм, ширина зуба  $s = 1$  мм, передача працює повільно, плавно і є ідеально недеформованою, тому нема ніякого збільшення напружень по ширині зуба і  $K_{F\beta} K_{Fv} = 1$ . В такому випадку  $\sigma_F = Y_F$  (МПа).

Таким чином, фізичний зміст коефіцієнта форми зуба – це напруження в одиничному зубі при одиничному навантаженні. Збільшення коефіцієнта форми зуба із зменшенням кількості зубів свідчить про те, що збільшуються і напруження в зубі.

При обчисленні коефіцієнта форми зуба  $Y_F$  згідно з формулою (15) для знаходження значень параметрів  $\gamma$  і  $\alpha$  скористасмося такими міркуваннями. Як було зазначено вище, вихідне положення профілів відповідає моменту торкання профілів зубів у точці  $P$  (рис. 1). У цей момент точка  $M$ , що належить одночасно профілям зубів двох зубчастих коліс в інший момент торкання, на профілях зубів позначена точками  $M_1$  і  $M_2$ .

У вихідному положенні в точках профілю зубчастого колеса 1 відомі їх координати та напрямки векторів дотичних  $\vec{k}$  до профілю, що визначаються їх напрямними косинусами або кутом нахилу дотичної до профілю  $\eta$ . На рис. 1 показані їх позначення для точки  $M_1$ .

Момент торкання профілів у точці  $M$ , коли точки  $M_1$  і  $M_2$  на профілях зливаються, відповідає повороту зубчастих коліс 1 і 2 на кути  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  відповідно. До відомої вихідної інформації також відносяться значення кутів торкання профілів  $\phi_2$  для різних точок [2]. Параметри рухів пов'язані між собою відповідно до залежностей:

$$\varphi_1 = i \cdot \varphi_2, \quad \omega_1 = i \cdot \omega_2, \quad (17)$$

$$i = \frac{r_2}{r_1} = \frac{z_2}{z_1}. \quad (18)$$

Із рис. 1 видно, що у момент торкання профілів у точці  $M$  значення кута  $\alpha'$ , який відповідає напрямку нормальної сили  $F_n$ , можна визначити як різницю кута нахилу дотичної до профілю  $\eta$  і кута повороту  $\varphi_1$  зубчастого колеса 1 згідно зі співвідношенням:

$$\alpha' = \eta - \varphi_2 \cdot \frac{r_1}{r_2}. \quad (19)$$

Після повороту зображення зуба зубчастого колеса 1 разом із прикладеною до нього у точці  $M$  силою навколо точки  $O_1$  до положення, яке є вихідним для побудови схеми розрахунку зуба на згин, напрямку нормальної сили  $F_n$  відповідає кут  $\gamma$ . Це положення можна отримати поворотом зображення зуба відносно вихідного положення профілів на кут  $\frac{\pi}{2z_1}$ , що є чвертю від кутового кроку зубчастого колеса  $\tau = \frac{2\pi}{z_1}$ . Таким чином,

$$\gamma = \eta - \frac{\pi}{2z_1}, \quad (20)$$

де  $\eta$  – кут нахилу дотичної до профілю у вихідному положенні профілів для точки  $M_1$ .

Кут  $\alpha$  відповідає напрямку нормальної сили  $F_n$ , що прикладена до точки профілю зуба колеса 1, яка контактує з профілем зуба колеса 2 в полюсі зачеплення  $P$ . Оскільки в момент торкання профілів зубів у точці  $P$  кути повороту зубчастих коліс  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  дорівнюють нулю, згідно зі співвідношенням (19) отримуємо вираз:

$$\alpha = \eta, \quad (21)$$

де  $\eta$  – кут нахилу дотичної до профілю у вихідному положенні профілів для точки  $P$ .

Значення коефіцієнтів  $l'$  і  $s'$  знайдемо відповідно до залежностей (9):

$$l' = \frac{l}{m}; \quad s' = \frac{s}{m}. \quad (22)$$

Обчисливши значення  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $l'$  і  $s'$  за формулами (20)-(22), а також вибравши значення теоретичного коефіцієнта концентрації напруження  $k_{\sigma T}$  з таблиці, за формулою (15) можна визначити значення коефіцієнта форми зуба для зубчастого колеса 1. Значення коефіцієнта форми зуба для зубчастого колеса 2 визначається аналогічним чином.

Було розроблено систему взаємопов'язаних програмних модулів на мові програмування Delphi, що дозволяє проводити комплексний аналіз якісних показників неевольвентних зубчастих передач:

- програмний модуль «Геометричне моделювання кінематичних кривих (LinesModel)»;
- програмний модуль «Дослідження якісних показників неевольвентних зубчастих зачеплень (Gears)».

Комп'ютерну програму LinesModel призначено для геометричного моделювання плоских кінематичних кривих як потенційних профілів бічних поверхонь зубів зуборізних інструментів для виготовлення неевольвентних зубчастих передач. При розробці програми застосовано математичний апарат багатопараметричних відображень простору, узагальнену уніфіковану структуру відображення для робочих і верстатних зубчастих зачеплень [11, 12]. Кінематична крива розглядається як безперервна траєкторія складного руху точки у триланковому зубчастому зачепленні.

За допомогою програми створено передумови для вибору з отриманого в результаті геометричного моделювання поля кінематичних кривих таких профілів зубів інструментів, які б забезпечували найбільш раціональне поєднання профілів зубів оброблених ними зубчастих коліс і необхідні якісні показники зубчастого зачеплення [13].

Комп'ютерну програму Gears призначено для геометричного аналізу процесу формування поверхонь зубів обкатними зуборізними інструментами за допомогою комп'ютерної графіки, розрахунку та аналізу якісних показників зубчастих зачеплень, утворених рейками з різним профілем бічних поверхонь зубів, вибору форми профілів зубів інструментів, що забезпечують найбільш раціональне поєднання профілів зубів оброблених ними зубчастих коліс [14]. Програму розроблено на базі узагальненої математичної моделі формування профілів ріжучої частини інструментів для формування неевольвентних зубчастих передач на основі кінематичного аналізу їх руху методами теорії відображень простору [11, 6].

У продовженні попередніх досліджень коефіцієнтів перекриття зубчастого зачеплення та тиску між зубами зубчастої передачі за допомогою програми було проведено серії чисельних експериментів для розрахунку та аналізу коефіцієнтів форми зубів зубчастих зачеплень, утворених рейками з різним профілем бічних поверхонь зубів.

На рис. 5 представлено порівняльні графіки зміни значень коефіцієнтів форми зуба  $Y_F$  при  $k_{\sigma T} = 1$  в залежності від кількості зубів  $z$  зубчастих коліс з  $m = 5$  мм, утворених інструментальними рейками з

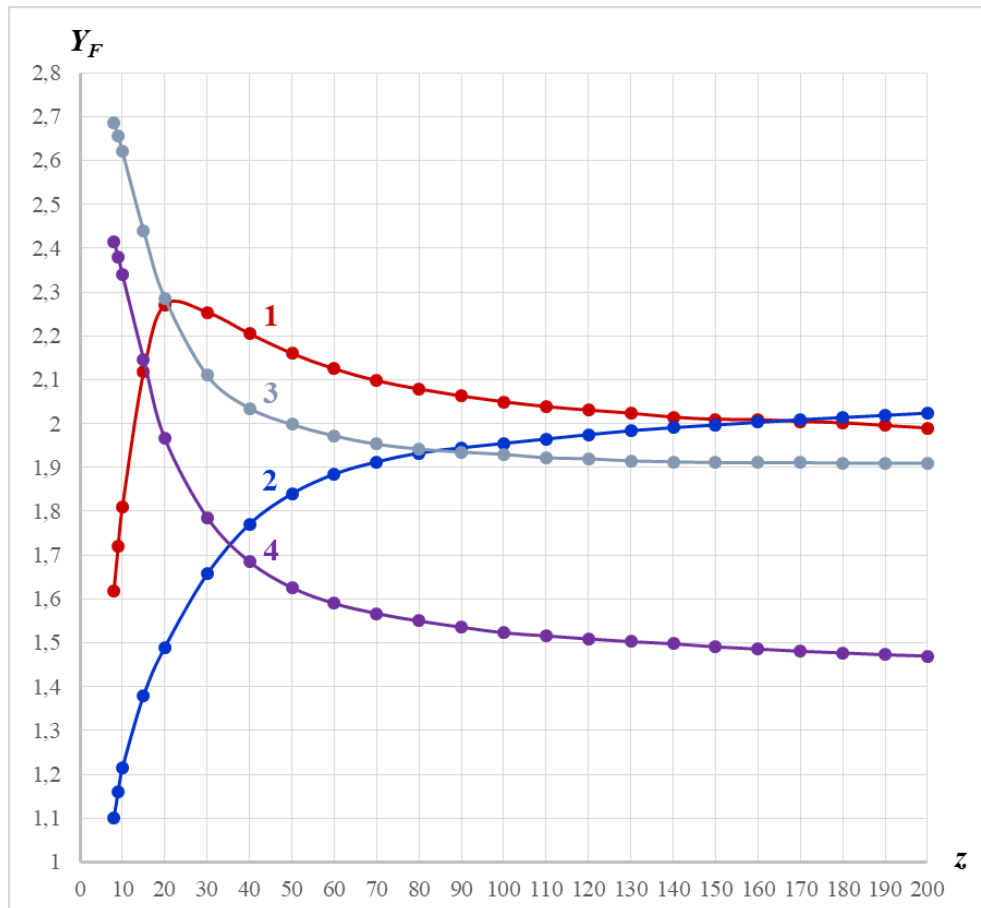
прямолинійним, увігнутим, опуклим та увігнуто-опуклим профілями зубів. Наведено середні у діапазонах  $z = 8-200$  і  $z = 20-100$  значення коефіцієнтів форми зуба  $Y_{F\text{ серед}}$  для зубчастих коліс, утворених рейками з різними типами профілів зубів.

Зменшення значень коефіцієнтів форми зуба в області невеликих значень кількості зубів  $z$  для евольвентних зубчастих коліс, утворених рейкою з прямолинійним профілем зубів, пояснюється наявністю підрізів на ніжках зубів зубчастих коліс і, як наслідок, зменшенням робочої висоти зубів.

У діапазоні  $z = 8-200$  для зубчастих коліс, утворених рейками з увігнутим і з увігнуто-опуклим профілями зубів, коефіцієнти форми зуба менші в середньому в 1.1 і в 1.2 рази, ніж для евольвентних зубчастих коліс, утворених рейкою з прямолинійним профілем зубів. Зубчасті колеса, утворені рейкою з опуклим профілем зубів, мають середні коефіцієнти форми зуба, що є сумірними з середніми коефіцієнтами форми зуба для евольвентних зубчастих коліс.

У діапазоні  $z = 20-100$  для зубчастих коліс, утворених рейками з увігнутим, з опуклим і з увігнуто-опуклим профілями зубів, коефіцієнти форми зуба менші в середньому в 1.2, в 1.1 і в 1.3 рази, ніж для зубчастих коліс, утворених рейкою з прямолинійним профілем зубів, тобто всі варіанти неевольвентних зубчастих коліс показують кращі результати.

Найбільш доцільними представляються варіанти зубчастих коліс, утворених рейками з увігнутим та з увігнуто-опуклим профілями зубів, що забезпечують найкращі значення коефіцієнтів форми зуба у порівнянні з евольвентними зубчастими колесами і внаслідок цього є більш міцними на згин.



Середні значення коефіцієнтів форми зуба для зубчастих коліс, утворених рейками з різними типами профілів зубів  
 для  $z = 8-200$ : 1 –  $Y_{F\text{ серед}} = 2,032$ ; 2 –  $Y_{F\text{ серед}} = 1,786$ ; 3 –  $Y_{F\text{ серед}} = 2,076$ ; 4 –  $Y_{F\text{ серед}} = 1,701$ ;  
 для  $z = 20-100$ : 1 –  $Y_{F\text{ серед}} = 2,147$ ; 2 –  $Y_{F\text{ серед}} = 1,807$ ; 3 –  $Y_{F\text{ серед}} = 2,023$ ; 4 –  $Y_{F\text{ серед}} = 1,650$ .

Рис. 5 – Графіки зміни значень коефіцієнтів форми зуба при  $k_{\sigma T} = 1$  в залежності від кількості зубів зубчастих коліс з  $m = 5$  мм, утворених: 1 – рейкою з прямолинійним профілем зубів; 2 – рейкою з увігнутим профілем зубів; 3 – рейкою з опуклим профілем зубів; 4 – рейкою з увігнуто-опуклим профілем зубів

**Висновки.**

Для комплексного аналізу якісних показників неевольвентних зубчастих зачеплень розроблено математичну модель розрахунку коефіцієнтів форми зубів зубчастої передачі. Виконано аналіз коефіцієнтів форми зубів зубчастих зачеплень, утворених рейками з різним профілем бічних поверхонь зубів. Результати чисельних експериментів показують, що неевольвентні зубчасті зачеплення можуть мати менші коефіцієнти форми зубів у порівнянні з евольвентними.

Створено передумови для вибору отриманого в результаті геометричного моделювання поля кривих таких профілів зубів інструментів, які забезпечували б найбільш раціональне поєднання профілів зубів оброблених ними зубчастих коліс і необхідні якісні показники зубчастого зачеплення.

**Список літератури:**

1. Tatyana Tretyak, Alexander Mironenko, Yury Gutsalenko, Natalia Krukova, Sergey Mironenko. Structural approach to the mathematical description and computer visualization of plane kinematic curves for the display of gears. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*, No 1 / 2018, Editura «Academica Brâncuși», Târgu Jiu. Pp. 7-11.
2. Tretyak Tatyana, Shelkovo Alexander, Gutsalenko Yury, Mironenko Alexander, Zubkova Nina, Mironenko Sergey, Structural approach to development of gearing with cutting of gears-links by rolling cutters of indirect linear side profile of teeth. *POLISH SCIENCE JOURNAL (ISSUE 5(14), 2019)*. Warsaw: Sp. z o. o. «iScience», 2019. Part 2. 165 p. P. 135-147.
3. Третьак Т.Е., Шелковой А.Н., Гуцаленко Ю.Г., Мironenko А.Л., Мironenko С.А. Математическое моделирование профиля зуборезного обкаточного инструмента для обработки неэвольвентных зубчатых колес. «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії»: Зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2019. № 3 (47). 230 с. С. 121-129.
4. Tatyana Tretyak, Yury Gutsalenko, Alexander Shelkovo, Alexander Mironenko, Sergey Mironenko. Mathematical modeling of the profile of a gear cutting rolling tool for machining of non-involute gear wheels. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*, No 2 / 2019, Editura «Academica Brâncuși», Târgu Jiu. P. 5-11.
5. Третьак Т.Е., Мironenko А.Л., Мironenko С.А. Исследование качественных показателей зубчатых передач со сложным неэвольвентным профилем боковых поверхностей зубьев. Вісник Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2. 85 с. С. 85-90.
6. Третьак Т.Е., Шелковой А.Н., Гуцаленко Ю.Г., Мironenko С.А. Анализ качественных показателей неэвольвентных зубчатых передач. Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПІ», 2019. Вып. 90. 188 с. С. 72-84.
7. Tretyak T., Gutsalenko Y., Mironenko A., Mironenko S. Research of quality indicators of non-evolvent gears. *Magyar Tudományos Journal (Budapest, Hungary)*. № 48 (2020). 52 p. P. 47-51.
8. Теорія механізмів і машин. Курс лекцій для студентів спеціальності „Динаміка і міцність машин”/ Автор: к.т.н., доц. О.П. Захочайко. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. –243 с.
9. Заблонский К.И., Белоконев И.М., Шекин Б.М. Теория механизмов и машин: Учебник. К.: Вища школа, 1989. 376 с.
10. Детали машин, теория механизмов и основы взаимозаминности : курс лекций для студентов технических специальностей / С. Г. Карнаух, М. Г. Таровик. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 252 с. ISBN 978-966-379-843-1
11. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхности резанием. Харьков: Вища шк., 1981. 152 с.
12. Кривошея А.В. Структура многопараметрического отображения, обобщающая станочные и рабочие зубчатые зацепления / А.В. Кривошея // Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика: Тезисы докл. Харьков: ХГПУ, 1995. С. 71.
13. Комп'ютерна програма «Геометрическое моделирование кинематических кривых» («LinesModel») / Третьак Т.Е., Шелковий О.М., Мironenko О.Л., Мironenko С.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 118397 від 24 квітня 2023 р.
14. Комп'ютерна програма «Исследование качественных показателей неэвольвентных зубчатых зацеплений» («Gears») / Третьак Т.Е., Шелковий О.М., Мironenko О.Л., Мironenko С.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 117622 від 28 березня 2023 р.

**References (transliterated)**

1. Tatyana Tretyak, Alexander Mironenko, Yury Gutsalenko, Natalia Krukova, Sergey Mironenko. Structural approach to the mathematical description and computer visualization of plane kinematic curves for the display of gears. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*, No 1 / 2018, Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu. Pp. 7-11.
2. Tretyak Tatyana, Shelkovo Alexander, Gutsalenko Yury, Mironenko Alexander, Zubkova Nina, Mironenko Sergey, Structural approach to development of gearing with cutting of gears-links by rolling cutters of indirect linear side profile of teeth. *POLISH SCIENCE JOURNAL (ISSUE 5(14), 2019)*. Warsaw: Sp. z o. o. «iScience», 2019. Part 2. 165 p. P. 135-147.
3. Tretyak T.E., Shelkovo A.N., Gucalenko Yu.G., Mironenko A.L., Mironenko S.A. Matematicheskoe modelirovanie profilya zuboreznogo obkatochnogo instrumenta dlya obrabotki neevolventnykh zubchatykh koles. «Visnik Donbaskoyi derzhavnoyi mashinobudivnoyi akademiyi»: Zb. nauk. prac. Kramatorsk: DDMA, 2019. № 3 (47). 230 s. S. 121-129.
4. Tatyana Tretyak, Yury Gutsalenko, Alexander Shelkovo, Alexander Mironenko, Sergey Mironenko. Mathematical modeling of the profile of a gear cutting rolling tool for machining of non-involute gear wheels. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*, No 2 / 2019, Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu. P. 5-11.
5. Tretyak T.E., Mironenko A.L., Mironenko S.A. Issledovanie kachestvennykh pokazatelej zubchatykh peredach so slozhnym neevolventnym profilem bokovykh poverhnostej zubev. Visnik Nacionalnogo Tehnichnogo Universitetu «Harkivskij Politehnicnij Institut». Zbirnik naukovih prac. Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Harkiv: NTU «HPi». 2020. № 2. 85 s. S. 85-90.
6. Tretyak T.E., Shelkovo A.N., Gucalenko Yu.G., Mironenko S.A. Analiz kachestvennykh pokazatelej neevolventnykh zubchatykh peredach. Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. Harkov: NTU «HPi», 2019. Vyp. 90. 188 s. S. 72-84.
7. Tretyak T., Gutsalenko Y., Mironenko A., Mironenko S. Research of quality indicators of non-evolvent gears. *Magyar Tudományos Journal (Budapest, Hungary)*. № 48 (2020). 52 p. P. 47-51.
8. Teoriia mekhanizmv i mashyn. Kurs lektzii dlia studentiv spetsialnosti „Dynamika i mitsnist mashyn” / Avtor: k.t.n., dots. O. P. Zakhovaiko. – K.: NTUU "KPI", 2010. – 243 s.
9. Zablonskij K.I., Belokonev I.M., Shekin B.M. Teoriya mekhanizmov i mashin: Uchebnik. K.: Visha shkola, 1989. 376 s.
10. Detali mashyn, teoriia mekhanizmv i osnovy vzaieozaminnosti : kurs lektsii dlia studentiv tekhnichnykh spetsialnostei / S. H. Karnaukh, M. H. Tarovyk. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – 252 s. ISBN 978-966-379-843-1

11. Perepelica B.A. Otobrazhenie affinnogo prostranstva v teorii formoobrazovaniya poverhnosti rezaniem. Harkov: Visha shk., 1981. 152 s.
12. Krivosheya A.V. Struktura mnogoparametricheskogo otobrazheniya, obobshayushaya stanochnye i rabochie zubchatye zacepleniya / A.V. Krivosheya // Vysokie tehnologii v mashinostroenii: modelirovanie, optimizatsiya, diagnostika: Tezisy dokl. Harkov: HGPU, 1995. S. 71.
13. Komp'yuterna programa «Geometricheskoe modelirovanie kinematicheskikh krivykh» («LinesModels») / Tretyak T.Ye., Shelkovij O.M., Mironenko O.L., Mironenko S.O. Svidoctvo pro reyestratsiyu avtorskogo prava na tvir № 118397 vid 24 kvitnya 2023 r.
14. Komp'yuterna programa «Issledovanie kachestvennykh pokazatelej neevolventnykh zubchatyh zaceplenykh» («Gears») / Tretyak T.Ye., Shelkovij O.M., Mironenko O.L., Mironenko S.O. Svidoctvo pro reyestratsiyu avtorskogo prava na tvir № 117622 vid 28 bereznya 2023 r.

Надійшла (received) 21.01.2026

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Мироненко Сергій Олександрович (Myronenko Sergij)** - аспірант кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка (ІТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8076-459X>, e-mail: [serg1prime@gmail.com](mailto:serg1prime@gmail.com).

*СКІДІН І. Е., САЙТГАРЕЄВ Л. Н., ЧУБЕНКО В. А., ЄВТУШЕНКО С. Д., МІШИН М. М.*

## АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЧАСОВОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ РОЗПЛАВІВ

У сучасному ливарному виробництві при отриманні виливків з алюмінієвих сплавів широко використовуються вторинні матеріали – відходи, повернення, брухт. При цьому вміст лому і відходів виробництва в шихті може становити до 100 %. Тому необхідно застосовувати більш досконалі способи плавки і обробки сплавів, у тому числі і раціональні температурні режими лиття. Для поліпшення структури і механічних властивостей багатьох ливарних алюмінієвих сплавів регулюють режими плавки і заливки, застосовують операції модифікування, рафінування, обробку фізичними впливами, створюють особливі умови кристалізації виливків. Наукова новизна роботи полягає у встановлених закономірностях впливу параметрів термочасової обробки розплаву на механічні властивості і якісні показники виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих способом ЛГМ, при використанні до 90 % вторинних матеріалів в шихті. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні можливості підвищення механічних властивостей сплавів, отриманих з переважанням вторинних матеріалів в шихті, а також якісних показників виливків завдяки оптимальним температурам перегріву та лиття. Результати. Визначено раціональні параметри термочасової обробки алюмінієвих розплавів ( $T_{\text{ПЕР}} = 990 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 5 \dots 10 \text{ хв}$ ) з вмістом у шихті 85...90 % вторинних матеріалів, які забезпечують задовільну чистоту поверхні, розмірну точність, мінімальну пористість, підвищений рівень механічних властивостей і герметичність виливків, отриманих методом ЛГМ.

**Ключові слова:** виливок, алюмінієвий розплав, термочасова обробка, вторинні матеріали, пористість, механічні властивості

### SKIDIN I., SAITGAREYEV L., CHUBENKO V., EVTUSHENKO S., MISHYN M. OPTIMAL PARAMETERS OF HEAT AND TIME TREATMENT OF ALUMINUM MELTS

In modern foundry production, secondary materials such as waste, returns, and scrap are widely used to produce aluminium alloy castings. Therewith, the scrap and production waste content in the charge can be up to 100%. Therefore, it is necessary to apply more advanced methods of melting and processing alloys, including rational casting temperature conditions. Melting and pouring modes are regulated, and modification, refining, physical treatment, and special conditions for casting crystallisation are used to improve the structure and mechanical properties of many casting aluminium alloys. The scientific novelty of the paper lies in the established regularities of the influence of melt heat treatment parameters on the mechanical properties and quality indicators of castings from aluminium alloys produced by the LFC method, using up to 90 % of secondary materials in the charge.

The practical importance of the study is in substantiating the possibility of improving the mechanical properties of alloys obtained with a predominance of secondary materials in the charge, as well as the quality of castings due to optimal overheating and casting temperatures. Results. The rational parameters of thermal time treatment of aluminium melts ( $T_{\text{Overheat}} = 990 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 5 \dots 10 \text{ min}$ ) with the content of 85...90 % of secondary materials in the charge have been determined, which provide satisfactory surface cleanliness, dimensional accuracy, minimal porosity, increased mechanical properties and tightness of castings obtained by the LFC method. **Keywords:** casting, aluminium melt, heat treatment, secondary materials, porosity, mechanical properties

**Вступ.** Найбільш простим способом обробки розплавів є його температурна обробка. У загальному випадку під температурною обробкою розплаву слід розуміти перегрів вище температури ліквідус до або вище критичних температур, а також витримку при цих температурах, в результаті чого відбуваються структурні перебудови елементів розплаву. Проте, підвищення температури розплаву призводить до інтенсивного окиснення, яке залежить від складу шихтових компонентів, а отже й стримує широке застосування даного підходу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слід зазначити, що мікронеоднорідність розплавів обумовлена термічно стійкими мікрогрупуваннями або кластерами, успадкованими від структури шихтових матеріалів [1-3], Також, згідно [4, 5] перегрів є важливим чинником, що визначає процес кристалізації і впливає на мікроструктуру і механічні властивості виливків, при чому це пояснювалося тим, що збільшення вихідного перегріву металевого розплаву посилює переохолодження при кристалізації.

Таким чином, застосування високотемпературних перегрівів з оптимальними температурами плавлення при використанні в складі шихти підвищеної кількості вторинних матеріалів сприяє зменшенню рівня мікронеоднорідності розплавів та отримання алюмінієвих виливків з необхідним комплексом властивостей.

Особливо широко температурна обробка застосовується щодо отримання виливків з силумінів, при цьому спостерігається підвищення властивостей в литому стані [6-9]. Наприклад, перегрів сплаву АК7 до 850...900 °С, а потім охолодження його до 700 °С перед заливкою у металеву форму призвело до значного зниження газової пористості у виливках, подрібнення зерна, підвищення механічних властивостей на 20 % [3].

Технології, засновані на температурній обробці розплавів, вимагають значних витрат електроенергії, застосування складного та дорогого обладнання, але при цьому вони дозволяють використовувати при плавці до 100 % вторинних матеріалів в шихті, дають задовільні показники розмірів подрібнення зерна і збільшення центрів кристалізації порівняно зі способами домішкового модифікування [10, 11].

Будучи ефективною і доступною, температурна обробка отримує останнім часом все більший розвиток. Тому дослідження механічних властивостей та якісних показників виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих з використанням підвищеної кількості вторинних матеріалів в шихті, при змінних температурних параметрах плавки і лиття, є актуальними та перспективними.

**Мета дослідження** - визначити механічні властивості, герметичність та якісні показники виливків із алюмінієвих сплавів, отриманих способом лиття за газифікованими моделями (ЛГМ), при змінних температурних параметрах плавки і лиття та підвищеним вмістом вторинних матеріалів в шихті.

© І. Е.Скідін, Л. Н.Сітгарєєв, В. А.Чубенко, С. Д.Євтушенко, М. М.Мішин, 2025

**Методи дослідження.** Проведені дослідження базуються на стандартних сучасних методах визначення хімічного складу, механічних властивостей силумінів (ДСТУ 2839-94), герметичності та пористості виливків

**Викладення матеріалу та результати.** Термочасова обробка розплаву надає ефективний модифікуючий вплив на алюмінієві сплави і дозволяє отримати дрібнозернисту структуру і підвищені механічні властивості виливків.

Ефект термочасової обробки пов'язаний з тим, що швидкість структурних перетворень в рідкій фазі досить низька, незважаючи на порівняно великі швидкості процесів дифузії, тому швидке охолодження розплаву може значною мірою пригнічувати трансформацію кластерів.

Швидке охолодження розплаву при реалізації термочасової обробки можна досягати довалкою у розплав, наприклад, подрібнених чушкових сплавів відповідно до заданого хімічного складу литого сплаву. Дані добавки чинять модифікуючий ефект, вносячи мікронеоднорідності менших масштабів і активовані нерозчинні домішки, які є потенційними центрами кристалізації.

Необхідну кількість добавок твердої шихти для охолодження від температури перегріву до необхідної температури лиття визначалася експериментально, при цьому швидкість охолодження мала становити приблизно  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Програма проведення термочасової обробки розплаву при реалізації даної ресурсозберігаючої технології приведена на рис.1.

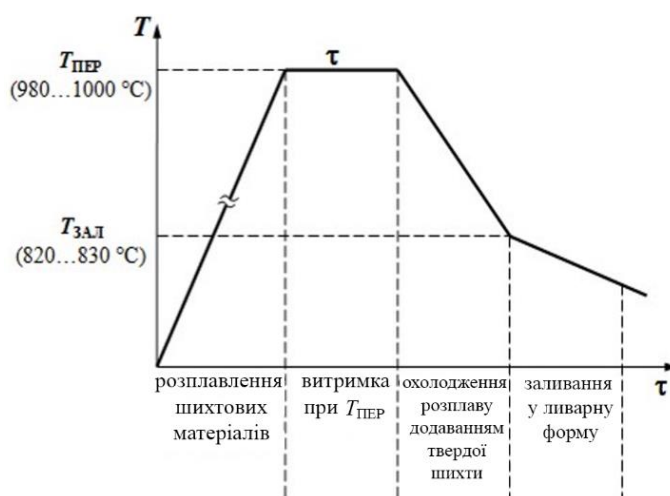


Рис. 1– Програма проведення термочасової обробки розплаву при отриманні алюмінієвих виливків

У ході досліджень було проведено визначення раціональних температурно-часових параметрів термочасової обробки (температури перегріву і часу витримки розплаву) шляхом дослідження якісних показників зразків (табл. 1). Дослідні плавки проводилися в печах ICT-0,06. В усіх експериментах температура заливки ( $T_{ЗАЛ}$ ) становила  $820\text{...}830\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що зумовлено повною деструкцією поліестіролової моделі. Охолодження розплавів до  $T_{ЗАЛ}$  з температури перегріву здійснювалося внесенням дрібного чушкового сплаву відповідного складу. Рафінування здійснювали при заливці в ливарну форму через фільтр СРФ-0,6.

Чистота поверхні виливків оцінювалась візуально, порівнянням з еталоном. Зразки, що мають дефекти, порівнювались з допустимими дефектами, зазначеними в технічних умовах. Розмірна точність перевірялась за ливарними кресленнями, на яких вказані розміри, що підлягають контролю. Механічні властивості і пористість визначалися на стандартних зразках згідно з ГОСТ 1583-93. Герметичність досліджувалася за критеріями гідроміцності за такою методикою: в зразок під тиском, створюваним гідропресом, подавалася вода; при появі течі реєструвався тиск, який й був критерієм оцінки герметичності зразка.

Якщо в серії експериментів з тими самими параметрами 10% зразків не задовольняли тому чи іншому показнику, то варіант перегріву і заливки вважався неефективним для даної технології. Якщо в якому-небудь варіанті в будь-якій серії спостерігалася недостатня пропалюваність пінополіестіролу, то варіант технології відносили до неефективних. Крім того, якщо в якому-небудь варіанті в будь-якій серії з випадкової вибірки з придатних зразків хоча б один мав бал пористості вище 3-го (визначений за методикою ВІАМ згідно ДСТУ 1583-93), то цей варіант технології також вважався неефективним.

Результати дослідження впливу температурно-часових параметрів плавки при реалізації термочасової обробки на якісні показники зразків (чистота поверхні, розмірна точність, пористість) з алюмінієвих сплавів АК7, АК12, АК9М2 показали, що при вмісті в шихті до 90 % вторинних матеріалів ефективність технології обробки забезпечується значенням температури перегріву  $T_{ПЕР} = 990\text{...}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і раціональним часом витримки  $\tau = 5\text{...}10\text{ хв}$ . Температура перегріву  $880\text{...}890\text{ }^{\circ}\text{C}$  або  $940\text{...}950\text{ }^{\circ}\text{C}$  є недостатньою для зниження рівня мікронеоднорідності розплаву і отримання якісного лиття.

Таблиця 1. - Вплив перегріву та витримки на якісні показники виливків

Тпер, °С	τ, мін.	Якісні показники зразків		Пористість	Ефективність програми обробки <sup>2</sup>
		Чистота поверхні <sup>1</sup>	Розмірноточність <sup>1</sup>		
Сплав АК7					
1040 1050...	0	–	+	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	–	+	є	–
	15	–	–	є	–
990...1000	0	–	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	–	+	є	–
940...950	0	+	–	немає	–
	5	–	+	немає	–
	10	+	+	є	–
	15	+	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	+	є	–
Сплав АК12					
1040...1050	0	–	+	немає	–
	5	+	+	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	–	є	–
990...1000	0	+	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	+	+	є	–
940...950	0	+	–	немає	–
	5	+	–	немає	–
	10	–	+	немає	–
	15	–	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	–	є	–
Сплав АК9М2					
1040..1050	0	+	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	є	–
	15	+	–	є	–
990...1000	0	–	+	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	+	+	немає	+
940...950	0	–	+	немає	–
	5	+	–	немає	–
	10	+	–	є	–
	15	+	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	+	–	є	–
	15	+	–	є	–

<sup>1</sup> «+» – задовільна; «–» – незадовільна;<sup>2</sup> «+» – ефективна; «–» – неефективна.

Вплив технології термочасової обробки при зазначених параметрах на чистоту поверхні, розмірну точність, механічні властивості і герметичність зразків із сплавів АК7, АК12, АК9М2 показано в табл. 2. Також в ній наведено механічні властивості виливків, отриманих за існуючою технологією плавки (з вмістом у шихті не більше 35...40 % вторинних матеріалів), яка полягала в тому, що високотемпературний перегрів не проводили, а перегрівали розплави тільки до 880...890 °С, при цьому до температури лиття (820...830°С) розплав охолоджувався разом із піччю.

Таблиця 2. - Вплив оптимальних параметрів термочасової обробки на якісні показники виливків

Сплав	Виливок	Умови плавки та обробки	Властивості виливків					
			Пористість, бал	Чистота поверхні <sup>1</sup>	Розмірна точність <sup>1</sup>	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	Герметичність, МПа
АК7	Корпус	Існуючі	4 - 5	–	+	174...185	2,2...2,6	11,0
		Пропоновані	3	+	+	203...210	3,3...3,5	12,3
АК12	Корпус	Існуючі	4 - 5	–	+	181...190	4,1...4,5	12,2
		Пропоновані	3	+	+	214...220	6,7...7,2	14,0
АК9М2	Вкладиш	Існуючі	3 - 4	+	–	200...207	1,5...1,8	13,3
		Пропоновані	2 - 3	+	+	227...233	2,1...2,3	15,2

<sup>1</sup> «+» – задовільна; «–» – незадовільна.

Згідно табл. 2, механічні властивості виливків після термочасової обробки, порівняно з виливками, отриманими за існуючою технологією, покращуються:

- для виливка «Корпус» зі сплаву АК7 часовий опір розриву  $\sigma_B$  – на 13,5...16,7 %, відносне подовження  $\delta$  – на 35...50 %; герметичність – на 11,8 %;
- для виливків «Корпус» зі сплаву АК12  $\sigma_B$  – на 15,8...18,2 %,  $\delta$  – на 60...63 %; герметичність – на 14,8 %;
- для виливків «Вкладиш» зі сплаву АК9М2  $\sigma_B$  – на 12,6...13,5 %,  $\delta$  – на 28...40 %; герметичність – на 14,3 %.

Впровадження розробленої ресурсозберігаючої технології при виплавці сплавів АК7, АК12, АК9М2 з застосуванням термочасової обробки (при 85...90 % вторинних матеріалів в шихті) і виготовленні високоякісних герметичних виливків способом ЛГМ дозволить за рахунок зниження витрат чушкових матеріалів отримати економічний ефект.

Проте, недоліком технології є те, що раціональні режими перегріву і кількість доданої твердої дрібнозернистої шихти необхідно визначати експериментально в кожному конкретному випадку виробництва. Крім того, не всі плавильні агрегати, що застосовуються при виробництві алюмінієвих розплавів, можуть забезпечити необхідні температури перегріву розплаву.

У табл. 3 наведено порівняльну ефективність пропонованої технології обробки з іншими ресурсозберігаючими технологіями. Аналіз усіх представлених технологій обробки розплавів показує задовільні показники приросту механічних властивостей виливків, виготовлених за газифікованими моделями при використанні термочасової обробки розплаву в порівнянні з литтям в кокіль і, як висновок – перспективність застосування даної технології.

Таблиця 3. - Порівняння пропонованої технології термочасової обробки з іншими

Відомості про технологію	Сплав	Вміст в шихті вторинних матеріалів, %	Виливок, метод лиття	Приріст механічних властивостей виливків порівняно з існуючою технологією	
				σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
$T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 5...10$ хв + заливка через СРФ-0,6 (пропонована)	АК7	85...90	«Корпус», ЛГМ,	16...20	50...60
$T_{\text{ПЕР}} = 1000...1020^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 10...12$ хв, рафінування 0,2 % $\text{MnCl}_2$	АК7ч	75...90	«Корпус», кокіль,	10...20	85...110
$T_{\text{ПЕР}} = 1030...1050^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 10...12$ хв, модифікування 0,1 % $\text{Si-Ba}$	АК7ч	80...85	«Корпус», кокіль,	7...22	80...125
$T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 8...10$ хв, рафінування 0,8 % флюсу	АК7ч	80...85	«Корпус», кокіль,	11...19	95...115
$T_{\text{ПЕР}} = 1010...1020^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 10$ хв	АК7ч	80...85	«Корпус», «Колесо насосне» кокіль,	13...22	90...119
$T_{\text{ПЕР}} = 1000...1020^{\circ}\text{C}$ , $\tau = 8...10$ хв, рафінування 0,8 % флюсу	АК7ч	70...85	«Крон-штейн», кокіль	15...23	96...122

Таким чином, була розроблена ресурсозберігаюча технологія отримання алюмінієвих сплавів для корпусного тонкостінного лиття за газифікованими моделями, що включає термочасову обробку розплаву. Технологія сприяла підвищенню рівня механічних властивостей виливків при переважанні вторинних матеріалів в шихті.

**Висновки** Експериментально визначено раціональні параметри термочасової обробки розплавів ( $T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5...10$  хв охолодження  $5^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ) при отриманні виливків з алюмінієвих сплавів методом ЛГМ.

Реалізація термочасової обробки розплаву дозволила при плавці використовувати підвищену кількість

вторинних матеріалів в шихті – до 85...90 %, при цьому виливки мають необхідну чистоту поверхні, розмірну точність, мінімальну пористість, герметичність, а також підвищений рівень механічних властивостей.

#### Список літератури

1. Кучер Д. С. Дослідження очищення алюмінієвих розплавів, отриманих із вторинної алюмінієвої сировини, фільтруванням. / Д.С. Кучер, Т.М. Нестеренко // Збірник наукових праць магістрантів факультету металургії ІІ ЗНУ. Вип. 1 (15). Запоріжжя: ІІ ЗНУ, 2019. С. 181-186.
2. Бредихін, В. М. Металургія кольорових металів [Текст] / Частина 7. Вторинна металургія кольорових металів. Підручник / Під ред. доктора технічних наук, професора Червоного І. Ф. // В. М. Бредихін, М. О. Маняк, В. О. Смирнов, В. І. Пожуєв, І. Ф. Червоний, В. П. Грицай. – Запоріжжя: В-во ЗДІА, 2009. -454 с.
3. Пат. України на корисну модель № 141729 МПК C21C1/00 Спосіб термочасової обробки сплавів для фасонних виливків / Александров В.Д., Алімов В. І., Корв'якова Н. П., Георгіаду М. В Фролова С. О., Зозуля А. П. - заявл. 16.09.2019, № u 201909842, опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8
4. Косарев О. О. Термочасова обробка вторинних алюмінієвих сплавів в магнітодинамічній установці МДН-6А1 / О. О. Косарев // Спеціальна металургія. – 2010. – С. 84 – 89. [http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev\\_article\\_2010.pdf](http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev_article_2010.pdf)
5. Шпортко Г. Ю. Закономірності структуроутворення евтектичного силуміну з підвищеним рівнем механічних властивостей після керованого переходу з рідкого стану в твердий / Г.Ю. Шпортко ; Нац. металург. акад. України. — Д., 2007. — 20 с.
6. R.P. Barot Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 / R.P. Barot, M.P. Sutaria // Aluminium alloy Materials Today: Proceedings Volume 62, Part 6, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322027705?via%3Dihub>
7. Zhang, Q. Microporosity formation and dendrite growth during solidification of aluminum alloys: Modeling and experiment / Q. Zhang, D. Sun, S. Pan, M. Zhu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol.146, January. - DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
8. Чернега Д. Ф. Вплив водно на структуру та властивості алюмінієвих сплавів / Д.Ф. Чернега, В.М. Рибак // Київський політехнічний інститут. – Україна., - С. 117-125. [http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak\\_article.pdf](http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak_article.pdf)
9. Гринь О. М. Розвиток технологій алюмінію з вторинної сировини/ О. М. Гринь, В. М. Бредихін, І. Ф. Червоний, М. О. Маняк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 26 (999). – С.180- 185.
10. Lee, P.D. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: A review / P.D. Lee, A. Chirazi, D. See // Journal of Light Metals. – 2001. - vol.1, release 1. – P. 15 - 30. - DOI 10.1016/S1471-5317(00)00003-1.
11. Кучер Д. С. Дослідження комплексного рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих із вторинної алюмінієвої сировини / Кучер Д. С., Нестеренко Т. М. // Металургія як основа сучасної промисловості : матеріали XXIV науково-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів (м. Запоріжжя, 26–29 лист. 2019 р.). Т. І. Запоріжжя, 2019. С. 7–8.

#### Bibliography (transliterated):

1. Kucher D. S. Doslidzhennia ochyshchennia aliuminiievkykh rozplaviv, otrymanykh iz vtorynnoi aliuminiievoi syrovynny, filtruvanniam. / D.S. Kucher, T.M. Nesterenko // Zbirnyk naukovykh prats mahistrantiv fakultetu metalurhii II ZNU. Vyp. 1 (15). Zaporizhzhia: II ZNU, 2019. S. 181-186.
2. Bredykhin, V. M. Metalurhiia kolorovykh metaliv [Tekst] / Chastyna 7. Vtorynna metalurhiia kolorovykh metaliv. Pidruchnyk / Pid red. doktora tekhnichnykh nauk, profesora Chervonoho I. F. // V. M. Bredykhin, M. O. Maniak, V. O. Smyrnov, V. I. Pozhuiev, I. F. Chervonyi, V. P. Hrytsai. – Zaporizhzhia: V-vo ZDIA, 2009. -454 s.
3. Pat. Ukrainy na korysnu model № 141729 MPK C21C1/00 Sposib termochasovoi obrobky splaviv dlia fasonnykh vylyvkiv / Aleksandrov V.D., Alimov V. I., Korviakova N. P., Heorhiadu M. V Frolova S. O., Zozulia A. P. - zaiavl. 16.09.2019, № u 201909842, opubl. 27.04.2020, Biul. № 8
4. Kosariev O. O. Termochasova obrobka vtorynnykh aliuminiievkykh splaviv v mahnitodynamichnii ustanovtsi MDN-6A1 / O. O. Kosariev // Spetsialna metalurhiia. – 2010. – S. 84 – 89. [http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev\\_article\\_2010.pdf](http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev_article_2010.pdf)
5. Shportko H. Yu. Zakonomirnosti strukturoutvorennia evtektichnoho syluminu z pidvyshchenym rivnem mekhanichnykh vlastyvostei pislia kerovanoho perekhodu z riddkoho stanu v tverdyy / H.Yu. Shportko ; Nats. metalurh. akad. Ukrainy. — D., 2007. — 20 s.
6. R.P. Barot Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 / R.P. Barot, M.P. Sutaria // Aluminium alloy Materials Today: Proceedings Volume 62, Part 6, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322027705?via%3Dihub>
7. Zhang, Q. Microporosity formation and dendrite growth during solidification of aluminum alloys: Modeling and experiment / Q. Zhang, D. Sun, S. Pan, M. Zhu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol.146, January. - DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
8. Chernega D. F. Vplyv vodniu na strukturu ta vlastyvosti aliuminiievkykh splaviv / D.F. Chernega, V.M. Rybak // Kyivskyi politekhnichnyi instytut. – Ukraina., - S. 117-125. [http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak\\_article.pdf](http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak_article.pdf)
9. Hryn O. M. Rozvytok tekhnolohii aliuminiuu z vtorynnoi syrovynny/ O. M. Hryn, V. M. Bredykhin, I. F. Chervonyi, M. O. Maniak // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. – Kh: NTU «KhPI», – 2013. - № 26 (999). – S.180- 185.
10. Lee, P.D. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: A review / P.D. Lee, A. Chirazi, D. See // Journal of Light Metals. – 2001. - vol.1, release 1. – P. 15 - 30. - DOI 10.1016/S1471-5317(00)00003-1.
11. Kucher D. S. Doslidzhennia kompleksnoho rafinuvannia aliuminiievkykh rozplaviv, otrymanykh iz vtorynnoi aliuminiievoi syrovynny / Kucher D. S., Nesterenko T. M. // Metalurhiia yak osnova suchasnoi promyslovosti : materialy XXIV nauково-tekhn. konf. studentiv, mahistrantiv, aspirantiv, molodykh vchenykh ta vykladachiv (m. Zaporizhzhia, 26–29 lyst. 2019 r.). Т. І. Zaporizhzhia, 2019. S. 7–8.

Надійшла (received) 22.02.2026

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Скідін Ігор Едуардович (Skidin Ihor)** - к.т.н., старший викладач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг, Україна; тел.: +38 098 212 93 42, e-mail: [skidin\\_ie@knu.edu.ua](mailto:skidin_ie@knu.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3247-473.

**Сітгарєєв Леван Наїльєві (Saitgareiev Levan)** - к.т.н., доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг, Україна; тел. +38 096 367 63 71, e-mail: [saitgareev.levan@knu.edu.ua](mailto:saitgareev.levan@knu.edu.ua), ORCID: 0000-0002-6841-3202

**Чубенко Вікторія Анатоліївна (Shubenko Victoriya)** - к.т.н., доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету м. Кривий Ріг, Україна; тел.: +38 050 747 28 23, e-mail: [chubenko\\_va@knu.edu.ua](mailto:chubenko_va@knu.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3356-0285

**Євтушенко Степан Дмитрович (Yevtushenko Stepan)** - аспірант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна; тел.: +38 068 902 78 78, e-mail: [stepanco.00@ukr.net](mailto:stepanco.00@ukr.net) ORCID: 0000-0003-0154-4563

**Мішин Микита Миколайович (Mishin Mikita.)** - студент Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна; тел. +38 067 649 27 82, e-mail: [Prkol.ua82@gmail.com](mailto:Prkol.ua82@gmail.com), ORCID:0009-0006-0661-0725

*МЕЗЕНЦЕВА І. О., КУЗЬМЕНКО О. О., ВАМБОЛЬ С. О., МЕЗЕНЦЕВ С. М.***ЗАПОБІГАННЯ ВИРОБНИЧОМУ ТРАВМАТИЗМУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ УМОВ ПРАЦІ**

В роботі приведені результати дослідження взаємозв'язку між кількістю потерпілих від нещасних випадків і професійних захворювань за останні 10 років і причинами виробничого травматизму з урахуванням особливостей умов праці на машинобудівних підприємствах. Розглянуті небезпечні і шкідливі фактори, що впливають на працівників машинобудівних підприємств. Показано, що більшість травм трапляється через невиконання інструкцій з охорони праці. Запропоновані рекомендації щодо зниження числа потерпілих. В першу чергу необхідно підвищувати рівень свідомості робітників і культури безпеки праці, покращувати навчання з питань охорони праці працівників і керівників усіх рівнів. Це не можливо зробити без викладання відповідних дисциплін у закладах вищої освіти майбутнім ведучим спеціалістам і керівникам структурних підрозділів. В свою чергу, фахівцям з охорони праці слід підвищувати вимоги щодо виконання своїх обов'язків в здійсненні системного контролю за своєчасною розробкою нових інструкцій, їх періодичним переглядом, проведенням позапланових інструктажів. Важливо удосконалити контроль стану здоров'я на початку зміни працівників, які обслуговують робочі місця підвищеної небезпеки.

**Ключові слова.** Виробничий травматизм, нещасні випадки, хронічні професійні захворювання, технічні, організаційні, психофізіологічні, техногенні причини, навчання з охорони праці, інструкції, позаплановий інструктаж.

**MEZENTSEVA I., KUZMENKO O., VAMBOL S., MEZENTSEV S.****PREVENTION OF OCCUPATIONAL INJURIES AT ENGINEERING ENTERPRISES TAKING INTO ACCOUNT THE FEATURES OF WORKING CONDITIONS**

The paper presents the results of a study of the relationship between the number of victims of accidents and occupational diseases over the past 10 years and the causes of industrial injuries, taking into account the peculiarities of working conditions at machine-building enterprises. Dangerous and harmful factors affecting workers at machine-building enterprises are considered. It is shown that most injuries occur due to failure to comply with occupational safety instructions. Recommendations are proposed to reduce the number of victims. First of all, it is necessary to raise the level of awareness of workers and the culture of occupational safety, improve training on occupational safety for employees and managers at all levels. This cannot be done without teaching relevant disciplines in higher education institutions to future leading specialists and heads of structural units. In turn, occupational safety specialists should increase the requirements for fulfilling their duties in exercising systematic control over the timely development of new instructions, their periodic revision, and conducting unscheduled briefings. It is important to improve health monitoring at the beginning of the shift of workers serving high-risk workplaces.

**Keywords:** Industrial injuries, accidents, chronic occupational diseases, technical, organizational, psychophysiological, technogenic causes, occupational safety training, instructions, unscheduled briefing.

**Вступ.** В умовах інтенсивного розвитку промисловості та впровадження сучасних виробничих технологій пріоритетним для людини залишається збереження професійного здоров'я працівників. Трудова діяльність висуває підвищені вимоги до фізичного та психоемоційного стану працівника (його витривалості, працездатності, емоційної стабільності тощо), тому професійне здоров'я стає вагомим ресурсом повноцінної й успішної професійної діяльності. Стан здоров'я робітників і тривалість їх життя багато в чому залежать від умов праці на робочих місцях, що характеризуються певними шкідливими і небезпечними факторами виробничого середовища, вплив яких може призвести, як до нещасних випадків так і професійних захворювань.

Згідно статистичних даних, ймовірність виробничого травматизму та професійних захворювань в Україні у 5–8 разів вища, ніж в інших промислово розвинених країнах Європейського Союзу. Навіть системний спад виробництва в нашій країні суттєво не зменшив кількість випадків виробничого травматизму – щорічно понад 3,5 тисячі робітників отримують професійні захворювання, близько 50 тисяч чоловіків травмується, з них 1,5 тисячі із смертельним наслідком [1, 2].

Машинобудування – провідна галузь промисловості, яка випускає різноманітні машини і устаткування для багатьох сфер діяльності. За показниками виробничого травматизму машинобудування відноситься до однієї з найбільш травмонезбезпечних галузей промисловості [3] через велику кількість різних складних технологічних процесів і обладнання. Одним із основних виробничих процесів на машинобудівних підприємствах є обробка матеріалів різанням, метою якої є зміна форми, розмірів та якості поверхонь виробів. Обробка різанням – найбільш трудомістка частина технологічного процесу виготовлення деталей, наприклад у турбобудуванні її доля досягає 70 %, у верстатобудуванні – до 60 %. Вона може здійснюватися без зняття стружки (обкатування, розкатування, продавлювання, калібрування, дорнування, вигладжування та ін.) і зі зняттям стружки – обробка різанням з використанням лезового або абразивного інструменту. Незважаючи на значний прогрес у технології виробництва точних заготовок і тенденції росту долі тільки чистової обробки, вага і значимість чорнової механічної обробки ще зберігається [4].

До основних травмонезбезпечних виробничих факторів, які можуть впливати на працівників в процесі обробки різанням, можна віднести небезпеку поразки електричним струмом та наявність рухомих частин верстатів і механізмів [4]: різальних інструментів (фрез, свердл та ін.), абразивних кругів, пристосувань для закріплення оброблюваних деталей, оброблюваних заготовок та інші пристроїв, що швидко обертаються і можуть захопити одяг або призвести до травми. При випадковому зіткненні з ними в процесі роботи чи у разі їх раптового руйнування, при розриві шліфувального або заточувального круга, дискової фрези, виліті вставних

ножів торцевих фрез або заготовки у разі недостатньо надійного її закріплення в кулачковому патроні тощо.

Травма може бути завдана падінням важкої заготовки, що встановлюється на верстат або знімається з верстата вручну без відповідних пристосувань. Привідні і передавальні механізми верстата, особливо ходові гвинти і валики токарних і револьверних верстатів, а також ремінні, ланцюгові і зубчасті передачі можуть завдати травми в процесі налагодження, змащування і ремонту обладнання. Металева стрічкова (зливна) стружка і стружка-«в'юн», що утворюються при точінні й свердленні сталевих виробів, становить небезпеку для верстатника, так як може заплутатися навколо різця, заготовки, супорту, задньої бабки, важелів управління та інших частин верстатів. У таких випадках необхідно зупинити верстат, щоб розплутати стружку, а це призводить до непродуктивних витрат часу. Крім того робітник наражається на небезпеку поранення рук і обличчя. Присутність стружки на важелях управління іноді унеможливує своєчасне виключення верстату. Стружка, що відлітає під час точіння крихких металів і фрезерування заготовок, а також крупні пилові частинки становлять небезпеку для очей [4].

Основними шкідливими виробничими факторами при обробці різних матеріалів різанням є пил оброблюваного матеріалу і пари мастильно-охолоджувальної рідини, токсичні речовини, підвищені шум і вібрація, незадовільні параметри мікроклімату і виробничого освітлення тощо [4].

Окрім обробки матеріалів різанням на підприємствах машинобудівної галузі широко використовуються також такі виробничі процеси, як зварювальні, ливарні, термічні та ковальсько-пресові роботи, гальванічні та фарбувальні процеси. Більшість з них відносять до робіт із підвищеною небезпекою, які потребують суворого контролю з боку керівництва підприємства, безпосередніх керівників робітників і фахівців в сфері охорони праці. Тому питання формування у працівників всіх ланок світогляду щодо важливості питань безпечних експлуатації обладнання та організації технологічних процесів у найбільш складній галузі промисловості – машинобудуванні, потребують особливої уваги.

**Аналіз літератури.** Проблема виробничого травматизму у галузі машинобудування вивчається багатьма вітчизняними вченими [3, 5–18]. Особливості умов праці на підприємствах машинобудівної галузі вказані у роботах [4, 10, 11, 16], автори яких розглянули основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що впливають на робітників при обробці матеріалів різанням – найбільш розповсюджені процесу машинобудівного виробництва. В дослідженнях [12, 13, 18] показано, що перше місце серед професійних захворювань на машинобудівних виробництвах займають захворювання органів дихання і що, окрім забезпечення працівників засобами колективного і індивідуального захисту, необхідно проводити роз'яснювальну роботу щодо правил їх використання.

Більшість авторів звертають увагу на складність вирішення питання зниження виробничого травматизму на машинобудівних підприємствах, яке потребує комплексного підходу до оцінювання впливу різноманітних шкідливих і небезпечних факторів, які діють на працівників на різних робочих місцях. На думку авторів роботи [3], машинобудування відрізняється від інших галузей наукоємністю, металомісткістю і трудомісткістю, коли для виготовлення готової продукції потрібні трудові ресурси високої кваліфікації і тривалий час. З їх точки зору, основною проблемою розвитку машинобудування в Україні є застарілість основних засобів виробництва на підприємствах.

В роботах [9, 10–14] підкреслено, що для профілактики травматизму необхідно розробляти методи прогнозування і оцінки потенційних ризиків для кожного робочого місця на всіх етапах виробничих процесів. Пропонується оцінювати виробничі ризики на робочих місцях на базі інформації за попередні періоди та урахувати системність порушень вимог нормативних актів з охорони праці як працівниками, так і роботодавцями [9, 10]. Високий рівень травматизму в машинобудуванні обумовлює необхідність постійного моніторингу та удосконалення методів його профілактики [14].

Облік даних щодо нещасних випадків та професійних захворювань на виробництві до 2022 року було покладено на Фонд соціального страхування України (ФССУ). Дані виробничого травматизму були у вільному доступі, що дозволяло робити ретельний аналіз і пропонувати відповідні висновки. З 1 січня 2023 року питання обліку нещасних випадків та професійних захворювань на виробництві було покладено на територіальні управління Пенсійного фонду України та Державної служби з питань праці (Держпраці), які стали надавати статистичні дані тільки по своїм окремим регіонам, в яких вони знаходяться. У зв'язку з відсутності систематичних даних щодо стану виробничого травматизму з 2023 року, буде корисним проведення ретроспективного аналізу статистичних даних щодо виробничого травматизму.

Для профілактики виробничого травматизму важливу інформацію несуть статистичні дані щодо причин нещасних випадків з урахуванням особливостей умов праці на підприємствах [6–8, 17, 18], бо саме знання причин допомагає розробляти заходи щодо попередження нещасних випадків. В різних галузях виробництва види подій, що призвели до нещасного випадку можуть відрізнятися між собою, але причини, що призвели до травми, можуть бути однаковими.

**Мета роботи** – встановити взаємозв'язок між кількістю потерпілих від нещасних випадків і професійних захворювань в різні періоди та причинами виробничого травматизму з урахуванням особливостей умов праці на машинобудівних підприємствах і визначити напрями розробки рекомендацій щодо зниження числа потерпілих і підвищення результативності заходів з охорони праці.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження базується на даних відкритих джерел інформації за період з 2017 по 2025 рік. Проаналізована статистична інформація ФССУ, Пенсійного фонду, Держпраці та Департаменту соціальної політики Харківської міської ради. Враховувалися нещасні випадки, які призвели до травмування, в тому числі з летальним наслідком, гострі професійні отруєння та захворювання (розслідуються як нещасні випадки [19]), а також хронічні професійні захворювання. Для аналізу виробничого травматизму були застосовані статистичний та груповий методи.

Статистичний метод є найбільш поширеним методом дослідження виробничого травматизму. Цей метод ґрунтується на вивченні даних по травматизму за документами, що реєструють нещасні випадки (акти за формою Н-1, листки тимчасової непрацездатності і тому подібне), за певний період часу (квартал, півріччя, рік).

При груповому методі дані про травматизм групують за однорідними ознаками: за професіями, характером роботи, стажем та віком працівників, характером одержаних травм, джерелами травмування, днями тижня та годинами зміни, коли сталося травмування і т. п. Обробка та аналіз одержаних результатів дозволяє визначити професії, види робіт, устаткування, механізми, технологічні процеси тощо, на які припадає найбільше число випадків травматизму.

**Результати досліджень.** Для визначення особливостей динаміки виробничого травматизму в Україні за останні 10 років була досліджена динаміка змін причин нещасних випадків у різні періоди.

Кількість нещасних випадків і хронічних професійних захворювань у період із 2017 по 2024 рр., на які у відповідному році були складені акти за формами Н-1/П та П-4 і які під час розслідування були визнані як пов'язані з виробництвом – страхові випадки, представлені на рисунку 1.

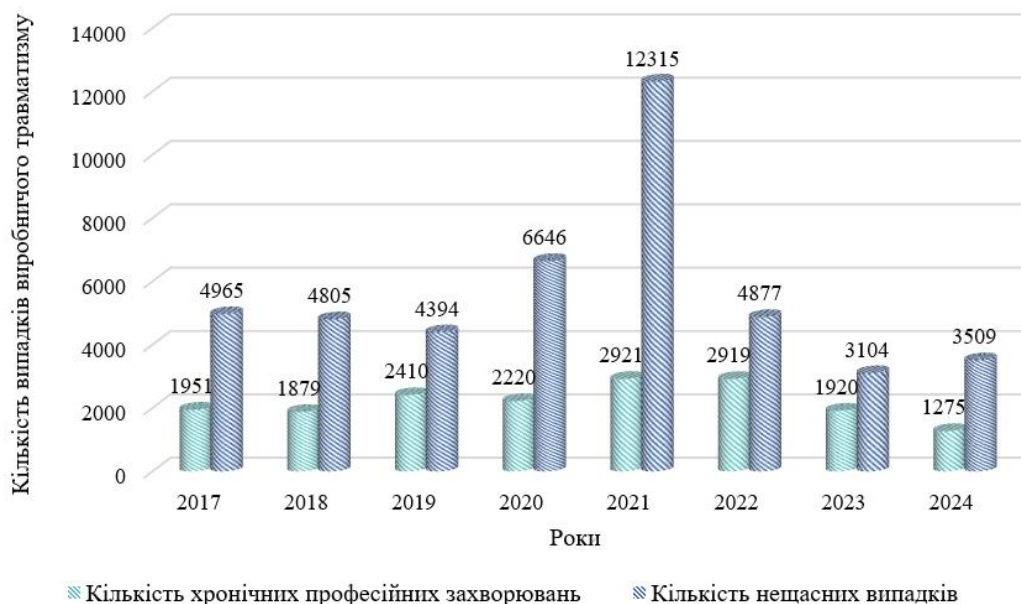


Рис.1 – Кількість нещасних випадків і професійних захворювань у період із 2017 по 2024 рр

Із рисунка видно, що в кожному році кількість нещасних випадків в декілька разів перевищувала кількість хронічних професійних захворювань. Але треба взяти до уваги, що хронічна патологія накопичується в організмі роками і, як правило, є невеликою. Тому хронічні професійні захворювання, які виявлені в кожному році, додаються до загальної кількості захворювань, що виявлені у попередні роки. Крім того хронічні захворювання можуть спричинити негативні спадкові генетичні наслідки (у нащадків). Тому не дивлячись на відносно низькі цифри хронічних захворювань у порівнянні з кількістю нещасних випадків, їх профілактиці теж треба приділяти посилену увагу.

Найбільша кількість нещасних випадків і професійних захворювань спостерігалася у 2020 та 2021 рр., що було пов'язано з захворюванням на Covid-19 [17, 18], яке відноситься до гострих професійних захворювань [19]. При порівнянні з докарантинним періодом (2019 р.) кількість страхових нещасних випадків за 2021 рік збільшилась у 2,8 рази (з 4 394 до 12 315) [17]. Для хронічних професійних захворювань в 2021 році теж спостерігалася підвищення кількості випадків (приблизно на 30 %), що, швидше за все, пов'язано з ослабленням у людей імунітету під час пандемії і пришвидшенням розвитку професійного захворювання.

На рисунку 2 представлені дані щодо основних діагнозів хронічних професійних захворювань. З приведених результатів видно, що в структурі професійних захворювань на підприємствах України перше місце належало хворобам органів дихання, друге місце – захворюванням опорно-рухового апарату (радикулопатії,

остеохондрози, артрити, артрози), третє місце залишалося за хворобами слуху, четверте – за вібраційною хворобою.

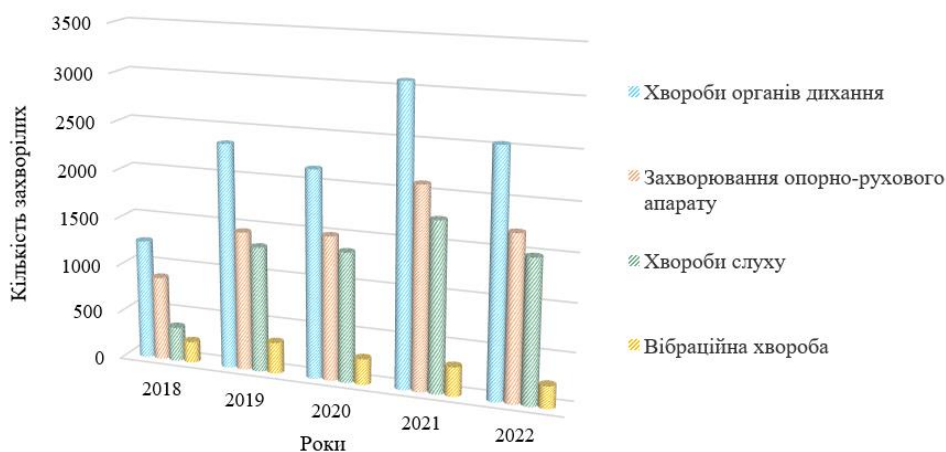


Рис. 2 – Розподіл хронічних професійних захворювань за діагнозами хвороби і роками

До професійних захворювань, пов'язаних з проблемами органів дихання, відносять пневмоконіоз, сілікатоз, силікоз. Пневмоконіоз – хронічне захворювання легень, яке виникає внаслідок тривалого вдихання та відкладання в легенях пилу. Силікоз зумовлений впливом пилу, який містить вільний діоксид кремнію. Сілікатоз виникає внаслідок дії пилу мінералів, що утримують діоксид кремнію в зв'язаному стані з різними елементами: алюмінієм, магнієм, залізом, кальцієм та ін. [11].

Основними обставинами, внаслідок яких виникли хронічні професійні захворювання у 2018-2022 роках, це недосконалість та недоліки технологічного процесу, невикористання засобів індивідуального захисту, недосконалість робочого інструменту та механізмів [18]. Звертає на себе увагу той факт, що випадки через недосконалість та недоліки технологічного процесу збільшилися на 50 %, а по недосконалісті робочого інструменту та механізмів зменшилися приблизно на 50 %. Через невикористання засобів індивідуального захисту кількість випадків змінювалася в цей період незначно і коливалася в інтервалі  $13 \pm 2$  %. «Інші» обставини хронічних професійних захворювань склали 40-43 % всіх захворювань.

За даними Державної служби з питань праці [20] кількість травмованих зі смертельними наслідками у галузі машинобудування знаходиться на відмітці приблизно 10% (рис. 3). На підставі приведених даних бачимо, що машинобудування серед видів діяльності знаходиться на четвертому місці по кількості смертельно травмованих.

Динаміка кількості нещасних випадків в залежності від їх причин з 2017 по 2022 рік представлена на рисунку 4. Як видно з приведених даних, з 2020 року почали вести облік за четвертою групою причин (техногенні, природні, екологічні та соціальні – далі «техногенні»), яка була введена до Класифікатора причин у Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві [19] у 2019 році.

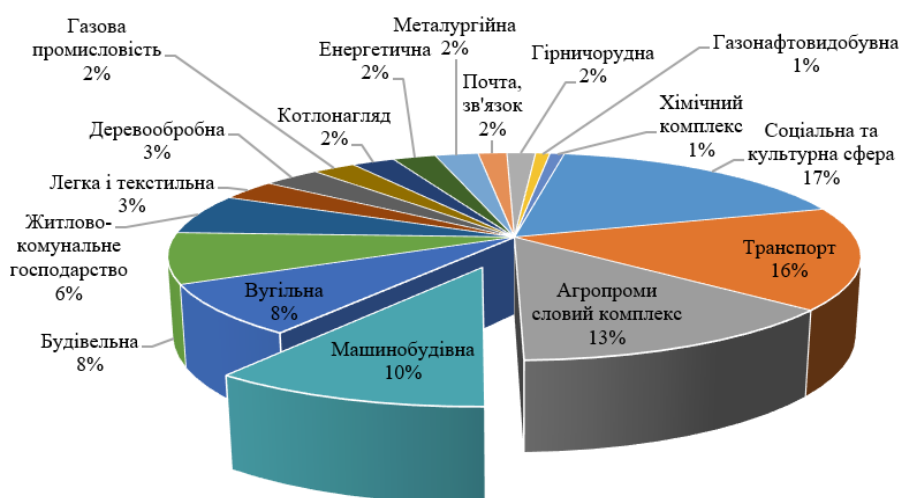


Рис. 3 – Кількість потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних з виробництвом, зі смертельним наслідком за видами діяльності у 2025 році

В 2021 році у порівнянні з 2020 роком зафіксовано додаткове суттєве зростання кількості нещасних випадків з організаційних і психофізіологічних причин (відповідно на 60 та 52 %), але на перше місце вийшли техногенні причини, кількість яких зросла більше ніж у 50 разів. І тільки кількість постраждалих з технічних причин зменшилася приблизно на 20 %.

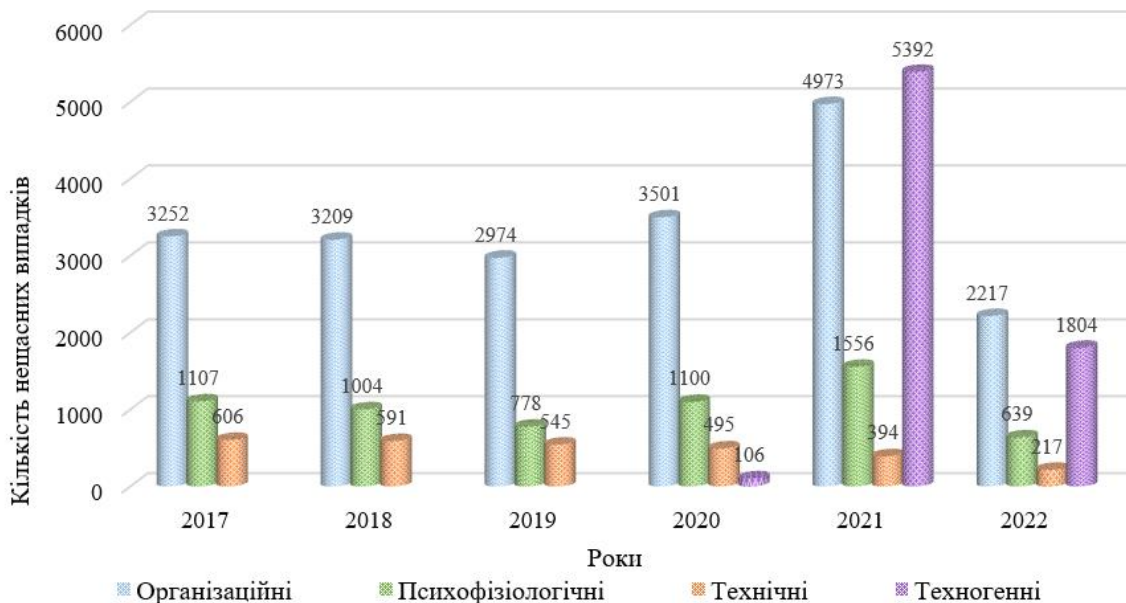


Рис. 4 – Динаміка кількості нещасних випадків в залежності від причин з 2017 по 2022 рік

До техногенної групи причин відносять надзвичайні ситуації, що пов'язані зі стихійним лихом та війною. Пандемія – це теж надзвичайна ситуація. Тому захворювання на Covid-19 були віднесені до тих, що трапилися з техногенних причин. У 2022 році мав місце значний загальний спад кількості виробничих травм, при цьому організаційні причини повернули втрачені позиції і знов стали лідерами.

На рисунку 5 представлені дані щодо найбільш вагомих організаційних причин виробничого травматизму.

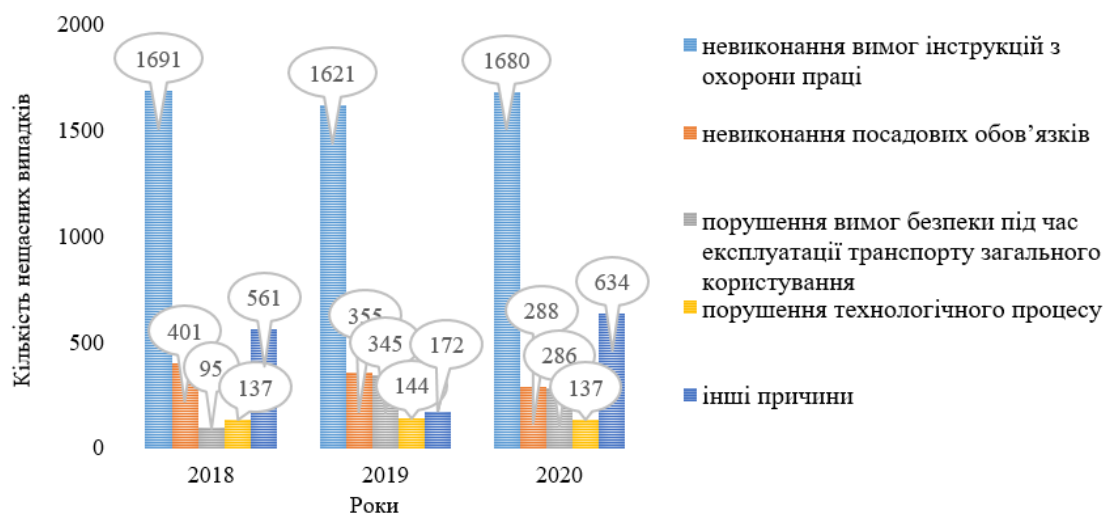


Рис. 5 – Найбільш розповсюджені організаційні причини нещасних випадків у період з 2018 по 2020 роки

Як видно із рисунка 5, найбільша кількість нещасних випадків трапилася через порушення трудової дисципліни – невиконання вимог інструкцій з охорони праці, невиконання посадових обов'язків, а також через порушення вимог безпеки під час експлуатації транспорту загального користування і порушення технологічного процесу.

Згідно даних ФССУ найпоширенішою психофізіологічною причиною в цей період стала особиста необережність потерпілого.

Кількість потерпілих у результаті нещасних випадків виробничого характеру за видами економічної діяльності у м. Харків за 2023 та рік наведено на рисунку 6 [20]. Із приведених даних видно, що найбільша кількість потерпілих спостерігається саме в сфері «Виробництво», до якої у Харківського регіону відноситься машинобудування. Друге і третє місце займають такі види економічної діяльності, як постачання електроенергії і транспорт.

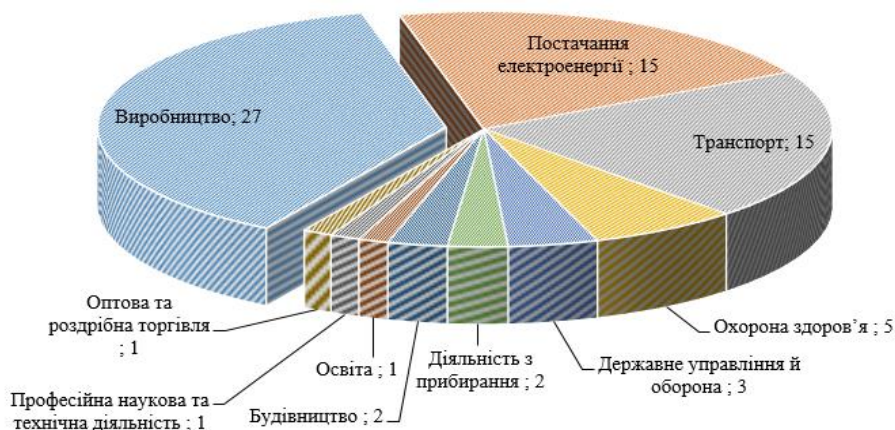


Рис. 6 – Кількість потерпілих у результаті нещасних випадків виробничого характеру за видами економічної діяльності у м. Харків за 2023 рік

У 2025 році на підприємствах м. Харкова сталося 65 випадків травматизму виробничого характеру (в тому числі 14 випадків, пов'язані з бойовими діями), з них – 8 із смертельним наслідком. Чисельність потерпілих склала – 101 особу, в тому числі із смертельним наслідком – 14 осіб [21].

Кількість зареєстрованих професійних захворювань у м. Харкові за 2023 рік [20] надана на рисунку 7. У 2025 році на підприємствах міста Харкова зареєстровано 3 випадки професійних захворювань [21]: 1 випадок на АТ «Світло шахтаря» та 2 випадки на ДП «Завод імені В.О. Малишева». Підприємства, на яких зареєстровані професійні захворювання у 2023 і 2025 роках, належать до галузі машинобудування.

Причини, за якими сталися вказані нещасні випадки, приведені на рисунку 8 [20], з якого видно, що у 2023 році найбільша кількість нещасних випадків трапилася через організаційні та техногенні причини. А так як випадків захворювання на Covid-19 в цей час не спостерігалось, то підвищення кількості нещасних випадків з техногенних причин пов'язано з військовими діями.

Таким чином, на протязі всього періоду обліку виробничого травматизму різними службами з 2017 по 2025 рр. найбільша кількість нещасних випадків, за виключенням 2021 р., трапилася через організаційні причини. І тільки у 2021 р. при помітному зростанні кількості травм з організаційних і психофізіологічних причин на перше місце вийшли техногенні причини.



Рис. 7 – Кількість зареєстрованих професійних захворювань у м. Харкові у 2023р.

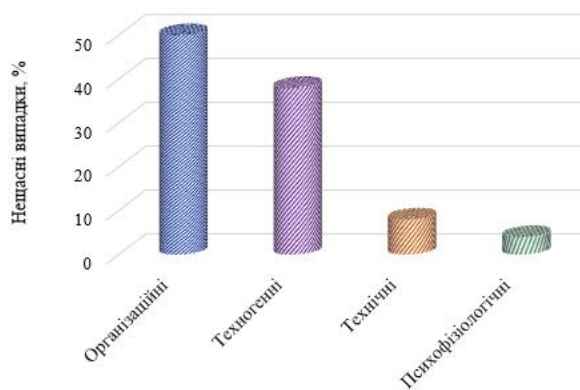


Рис. 8 – Причини нещасних випадків, за якими сталися нещасні випадки у м. Харків у 2023 році

**Обговорення результатів.** Нещасні випадки та професійні захворювання призводять до суттєвих економічних витрат у всьому світі. Так, кожен випадок виробничого травматизму в індустріальній державі (наприклад, європейській) обходиться приблизно у 500–1000 швейцарських франків на день [22], а витрати у Європейському Союзі, що пов'язані з професійними захворюваннями, складають щонайменше 145 млрд. євро на рік. За розрахунками Німецької ради підприємців усунення наслідків нещасних випадків коштує у 10 разів дорожче, ніж вартість заходів щодо їх попередження [2]. Тому фахівці давно дійшли висновку, що більш

економічно вигідно вкладати кошти в охорону праці, чим прирікати себе на постійну ліквідацію наслідків нещасних випадків і аварій на виробництві.

Розподіл нещасних випадків зі смертельним наслідком за видами діяльності (рис. 3) свідчить про той факт, що галузь машинобудування є однією із самих травмонебезпечних. Особливості травмонебезпечних факторів, а саме наявності рухомих частин верстатів і механізмів, різальних інструментів та заготовок, що швидко обертаються, полягають у тому, що вони призводять до значних травмувань, часто навіть смертельних [4, 23]. Виникає нагальна необхідність з'ясувати, за яким саме причинами стаються нещасні випадки, що пов'язані із експлуатацією обладнання, машин і механізмів, деталі яких рухаються та обертаються. Для профілактики виробничого травматизму надзвичайно важливе значення має правильне визначення причин нещасного випадку, бо саме причини служать вихідними даними для запобігання аналогічних нещасних випадків і кількості виробничих травм взагалі.

Привертає до себе увагу помітне і не зовсім очікуване зростання кількості нещасних випадків з організаційних і психофізіологічних причин у 2020 та 2021 роках (рис. 4), особливо якщо враховувати той факт, що в цей період більшість підприємств під час оголошених в країні карантинів із-за епідемія корона вірусу не працювали. Хворіли і робітники, і безпосередні їх керівники і інші фахівці. В таких умовах проводити належне рівні навчання, перевірку знань, первинні, повторні і позапланові інструктажі для нових робітників було нікому. Це викликало зростання нещасних випадків і додаткові невиходи на роботу із-за перебування потерпілих на лікарняному, що, в свою чергу, створювало додаткову плінність кадрів у трудовому колективі.

Як було показано на рисунку 5, найбільша кількість нещасних випадків з організаційних причин трапилася через невиконання вимог інструкцій з охорони праці, а з психофізіологічних причин – через особисту необережність потерпілого. Можливо, вказаний факт пов'язаний із психологічним станом людей і колективним стресом у суспільстві, на фоні якого робітники нехтували вимогами безпеки, а також невиходом на роботу кваліфікованих працівників через захворювання на Covid-19.

Дані представлені на рисунках 6-8 свідчать про те, що незважаючи на військовий стан в країні виробництво на Харківщині продовжує працювати. Слід зауважити, що до шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища додалась ще небезпека травмування через військові дії, про що свідчать дані за 2025 рік, в яких зазначено, що майже 20 % випадків травматизму виробничого характеру відбулися через бойові дії. Саме напружені та небезпечні умови праці зумовили зріст психофізіологічних причин, які вийшли на друге місце після організаційних (рис.8)

Відомо, що працівники не виконують вимоги інструкцій чи допускають особисту необережність, бо не прагнуть їх виконувати, або не знають, як це зробити, або взагалі не в змозі це зробити. Як профілактичні заходи в таких випадках рекомендують навчання і відпрацювання навичок безпечних прийомів роботи, пропаганда безпечної поведінки та розвиток культури безпеки, профвідбір і своєчасні медичні обстеження. На думку іноземних фахівців, які за програмою Міжнародної організації праці (МОП) працювали в Україні [22], велика кількість нещасних випадків зі смертельними наслідками пояснюється, в першу чергу, незадовільною підготовкою робітників і роботодавців з питань охорони праці.

В той же час, починаючи з 2018–2019 років, в закладах вищої освіти технічного спрямування спеціальні кафедри, які займаються підготовкою інженерів для різних сфер народного господарства, зокрема для галузі машинобудування, почали масово відмовлятися від викладання дисциплін «Охорона праці в галузі» чи «Безпека праці у професійній діяльності» на другому освітньому рівні, мотивуючи тим, що в галузевих стандартах вищої освіти [24] і, як слідство, в освітньо-професійних програмах відсутні компетенції, які б передбачали здатність здійснювати безпечну діяльність з урахуванням вимог охорони праці.

У разі здобування магістерського рівня освіти бакалаврами відповідної спеціальності відсутність дисциплін з охорони праці у магістратурі можна було б пояснити тим, що вони вже вивчали загальні вимоги з охорони праці. Так, освітні програми бакалаврів зі спеціальності «Галузеве машинобудування» передбачають компетентність – «здатність здійснювати заходи щодо профілактики виробничого травматизму й професійних захворювань, контролювати дотримання екологічної безпеки проведених робіт» [25]. Але часто до магістратури поступають бакалаври та магістри інших спеціальностей, які вирішили змінити напрям навчання або отримати другу освіту і не вивчали до цього вимоги безпеки праці у даній галузі. Коли такі фахівці потраплять на виробництво, вони не будуть мати відповідних знань з охорони праці.

Зміни, які відбуваються у закладах вищої освіти, призводять до зниження рівня свідомості і культури в питаннях безпеки праці у фахівців з вищою освітою, які, як керівники структурних підрозділів, відповідають за навчання безпечному веденню робіт своїх підлеглих. Як наслідок, маємо різке зростання рівня травматизму по причині невиконання вимог охорони праці. Особливо важливо це в галузі машинобудування, як однієї із травмонебезпечних галузей народного господарства, в якій трапляється значна кількість нещасних випадків і професійних захворювань.

Підготовка висококваліфікованого спеціаліста у тій чи іншій галузі знань передбачає постійний контакт закладів вищої освіти із зовнішніми стейкхолдерами з метою коригування та оптимізації освітньо-професійних програм [24]. Роботодавці зацікавлені у підготовці фахівців, які добре знаються не тільки на сучасних виробничих процесах і технологіях, але й на питаннях зниження потенційних ризиків і управління охороною праці.

Навчання і перевірку знань з питань охорони праці працівники проходять відповідно Типового положення [26], яке було затверджено у 2005 році. Восени 2022 року Міністерство економіки України підготувало документ щодо змін у Типовому положенні, який на цей час ще не затверджений. В новому документі рекомендувалося спрощення процедури проходження навчання і надання роботодавцям можливості самостійно визначати його форми та методи. При цьому не конкретизувалося, хто саме буде навчати робітників, а акцент робився на удосконаленні перевірки знань з питань охорони праці.

Враховуючи, що кількість нещасних випадків, які сталися по організаційним причинам через невиконання вимог безпеки, на протязі багатьох років залишається високою, а у закладах вищої освіти України студенти другого рівня освіти перестали отримувати знання з безпеки праці, необхідно ставити питання не про спрощення, а навпаки, про підвищення якості навчання з охорони праці робітників усіх рівнів і підготовку фахівців, які будуть проводити це навчання.

Якщо більшість нещасних випадків трапляються по причині порушення вимог інструкцій, можливо, треба удосконалити і Положення про розробку інструкцій з охорони праці від 1998 року [27] або покращити контроль за виконанням цього документу. Пункт 4.3.4. Положення [26] свідчить про те, що «розробка (перегляд) необхідних інструкцій, що діють на підприємстві, здійснюється безпосередніми керівниками робіт (начальниками виробництва, цеху, дільниці), які несуть відповідальність за своєчасне виконання цієї роботи». Інструкції, що діють на підприємстві, повинні переглядатися не рідше одного разу на 5 років, а для професій або видів робіт з підвищеною небезпекою – не рідше одного разу на 3 роки. Інструкції переглядаються також у випадку аварійної ситуації або нещасного випадку, що викликали необхідність перегляду (зміни) інструкції; при впровадженні нових технологій, зміні технологічного процесу або умов праці, а також при впровадженні нових видів обладнання, машин, механізмів тощо. І знов встає питання про кваліфікацію в питаннях охорони праці безпосередніх керівників робіт, які, як правило є спеціалістами з вищою технічною освітою, але майже не мають підготовки з охорони праці. Здійснення системного контролю за своєчасною розробкою нових інструкцій їх періодичним переглядом та внесенням змін і доповнень до них покладається роботодавцем на службу охорони праці підприємства, що вимагає і від фахівців відділів охорони праці ретельного виконання своїх обов'язків.

При проведенні розслідування нещасних випадків до складу комісії входить представник відділу охорони праці і саме він повинен стежити за тим, щоб в акті були вказані конкретні інструкції, порушення норм і правил яких призвело до нещасного випадку. Саме недосконалість самої інструкції могла привести до її порушення, бо іноді їх розробляють, не враховуючи всіх наявних на робочих місцях ризиків та небезпек чи не пропонує конкретні заходи безпеки. Можливо, треба ввести обов'язкове правило переглядати і перезатверджувати такі інструкції з метою їх покращення для чіткого і однозначного сприйняття представленої інформації. Наприклад, відомо, що великі за об'ємом документи погано засвоюються при навчанні.

При розслідуванні нещасних випадків і оформленні акту за формою Н-1 комісія з розслідування розробляє заходи для усунення причин травматизму, які обов'язково включають проведення позапланових інструктажів.

Згідно Типового положення [26], позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці при введенні в дію нових або переглянутих нормативно-правових актів з охорони праці, а також при внесенні змін та доповнень до них; при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці; при порушеннях працівниками вимог нормативно-правових актів з охорони праці, що призвели до травм, аварій, пожеж тощо, при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів. Інженери служби охорони праці повинні перевіряти виконання цих вимог Типового положення. Робітник який був тривалий час на лікарняному, повинен обов'язково проходити позаплановий інструктаж перед початком робіт.

Навчання керівників структурних підрозділів та ведучих спеціалістів питанням охорони праці повинно здійснюватися ще при їх навчанні у закладах освіти. Гарантам спеціальностей необхідно звернути увагу, в першу чергу, на компетентності, які стосуються безпечних прийомів ведення технологічних процесів і безпечної експлуатації виробничого обладнання, а також свідомого відношення до виконання вимог з охорони праці. Якісне навчання з питань безпеки праці є гарантією безпечного та безаварійного ведення технологічного процесу, сприяє збереженню здоров'я та життя працівників підприємств і становить фундаментальну основу для удосконалення системи управління безпекою праці та забезпечення ефективної профілактичної роботи щодо запобігання виробничого травматизму і професійним захворюванням.

**Висновки.** Виходячи із результатів досліджень можна рекомендувати:

- покращити якість навчання з питань охорони праці працівників усіх рівнів;
- повернути вивчення питань безпеки праці майбутніми керівниками структурних підрозділів і ведучими спеціалістами на етапі навчання у закладах вищої освіти, для чого рекомендувати ввести відповідні компетентності у галузеві стандарти освіти;
- підвищити вимоги до фахівців з охорони праці щодо виконання своїх обов'язків в здійсненні системного контролю за своєчасною розробкою нових інструкцій, їх періодичним переглядом та своєчасним внесенням змін і доповнень;

- інженерам служби охорони праці контролювати проходження позапланового інструктажу перед початком робіт робітників, які тривалий час були на лікарняному;
- ввести вимогу обов'язкового перегляду і перезатвердження інструкцій, порушення яких призвело до нещасного випадку;
- удосконалити контроль стану здоров'я на початку зміни працівників, які обслуговують робочі місця підвищеної небезпеки;
- систематично проводити роботу щодо зменшення плинності кадрів.

#### Список літератури

1. European Commission Employment, Social Affairs & Inclusion. <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=864&langId=en>
2. Сучасний стан охорони праці в Україні та за кордоном. <https://zlochiv.net/suchasnyy-stan-okhorony-pratsi-v-ukraini-ta-za-kordonom>
3. Таїрова Т. М., Романенко Н. В., Сліпачук О. А. Підвищення результативності заходів із запобігання виробничому травматизму на основі моделювання системи охорони праці в машинобудуванні / Т. М. Таїрова, Н. В. Романенко, О. А. Сліпачук // Проблеми охорони праці в Україні. № 36 (4), 2020. С. 23–29. DOI:10.36804/nddipbop.36-3.2020.23-29
4. Мезенцева І. О. Безпека виробничих процесів і устаткування [Електронний ресурс] : навч. посібник. Ч. 1. Організаційні та технічні заходи безпеки трудового процесу / І. О. Мезенцева ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2022. – 246 с. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/60344>
5. Аналіз стану виробничого травматизму по регіонах України / А. П. Березовський, О. М. Трус, Е. В. Прокопенко // Вісник Полтавської державної аграрної академії, № 3, 2021. С. 249–257. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.31>
6. Problems of occupational injuries and ways of its reduction on example of Ukraine / I. Mezentseva [et al.] // Diversity: disease preventive of research integrity. – 2024. – Vol. 4, Issue 2. – P. 54-62. <https://doi.org/10.24252/diversity.v4i2.42873>
7. Стан професійного здоров'я населення в Україні в мирний і воєнний час. / А. Нагорна, Н. Медведівська, А. Басанець, І. Стобан // Сімейна Медицина. Європейські практики, № 3, 2025. С. 46–51. <https://doi.org/10.30841/2786-720X.3.2025.339889>
8. Аналіз причин виробничого травматизму та шляхів його зниження в сучасних реаліях / І. О. Мезенцева [та ін.] // Проблеми охорони праці в Україні = Labour Protection Problems In Ukraine : зб. наук. пр. / ред. кол.: О. Є. Кружилко [та ін.]. Київ : ННДПБООП, Т. 39, № 3–4, 2023. С. 8–14. <https://doi.org/10.36804/nddipbop.39-3-4.2023.8-14>
9. До питання розроблення методології оцінювання виробничих ризиків у машинобудуванні / Т. М. Таїрова // Проблеми охорони праці в Україні. № 40 (3–4), 2024. С. 61–67. <https://doi.org/10.36804/nddipbop.40-3-4.2024.61-67>
10. Лис Ю.С. Сучасні підходи до системи управління охороною праці на машинобудівному підприємстві. Машинобудування, 2020. – вип. 25 – С. 168–78. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-168-178>.
11. Кузьменко О.О. Підвищення безпеки праці на машинобудівних підприємствах – важливий етап відновлення промислового господарства / О. О. Кузьменко, І. О. Мезенцева // Тези доповідей науково-практичної конференції «Наука XXI століття: інновації в умовах війни та повоєнного відновлення України», в межах VI Фестивалю науки. Харків, 16 травня 2023. С. 61–65. <https://www.calameo.com/read/000632945872d159fb29a>
12. Оцінка неканцерогенних ризиків від впливу хімічних речовин у працівників машинобудівного підприємства / Л. П. Шаравара // Перспективи та інновації науки. Педагогіка. Психологія. Медицина. №5, 2025. С. 3260–3270. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5\(51\)-3260-3270](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5(51)-3260-3270)
13. Співак М.О. Професійні захворювання у галузі машинобудування / М. О. Співак // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2024, [22–25 травня 2024 р.] / ред. Є. І. Сокол. Харків : НТУ "ХПІ", 2024. С. 389.
14. Аналіз та оцінка стану виробничого травматизму в галузі машинобудування / О. Г. Левченко, О. С. Ільчук // Вісник НТУУ «КПІ», Випуск 30, Серія «Гірництво», 2016. С. 171–176. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_gir\\_2016\\_30\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2016_30_25)
15. Аналіз динаміки та структури виробничого травматизму в Україні (1992-2024 рр.) і порівняння з країнами європейського союзу / О. І. Губачов // Комунальне господарство міст. Том 3, випуск 191, Серія: Технічні науки та архітектура. Цивільний захист. 2025. С. 559–569. DOI: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-559-570
16. Мезенцева І.О. Особливості безпеки праці при механічній обробці матеріалів різанням / І. О. Мезенцева, В. В. Мирошніченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health. Тези доп. 29-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2021, [18-20 травня 2021 р.] : у 5 ч. Ч. 3 / ред. Є. І. Сокол. Харків : Планета-Прінт, 2021. С. 289.
17. Зниження виробничого травматизму як шлях вирішення проблеми дефіциту кадрів і зменшення ризиків в енергетиці / О. О. Кузьменко [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2024. – № 1 (8). – С. 55-63. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.04>
18. Trends and Challenges of Chronic Occupational Morbidity in Ukraine: A Sectoral Analysis and Preventive Strategies / Iryna Mezentseva [et al.] // Diversity: Disease Preventive of Research Integrity. – 2025. – Vol. 5, iss. 2. – P. 60-68: // Diversity: Disease Preventive of Research Integrity, № 5(2), 2025. P. 60–68. <https://doi.org/10.24252/diversity.v5i2.52247>
19. Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві. Затвердж. постановою Кабінету Міністрів України від 17.04.2019 р. № 337 зі змінами. <https://zakon.rada.gov.ua/go/337-2019-%D0%BF>
20. Сайт Департаменту соціальної політики Харківської міської ради (2023, Січень) Стан виробничого травматизму та професійних захворювань у м. Харкові за 2023 рік <https://soczahist.kh.ua/2024/01/про-стан-виробничого-травматизму-та-/#:~:text=Харкові%20за%202023%20рік.-29.01.2024%20%7C%20>
21. Сайт Департаменту соціальної політики Харківської міської ради. Стан виробничого травматизму та професійних захворювань у м. Харкові за 2023 рік <https://soczahist.kh.ua/2026/01/стан-травматизму-та-профзахворювань/>
22. Охорона праці в Україні та за кордоном: система менеджменту охорони здоров'я та професійної безпеки. <https://oppb.com.ua/articles/ohorona-praci-v-ukraini-ta-za-kordonom-systema-menedzhmentu-okhorony-zdorovya-ta-profesijnnoji-bezpeki>
23. Охорона праці і пожежна безпека (2024, березень) / Працівникам машинобудівного підприємства наголосили на безпеці під час експлуатації обладнання, машин і механізмів, деталі яких рухаються та обертаються <https://oppb.com.ua/news/pratsivnykam-mashynobudivnogo-pidpryyemstva-nagolosyly-na-bezpetsi-pid-chas-ekspluatatsiyi-obladnannya-mashyn-i-mehanizmiv-detali-yakyh-ruhayutsya-ta-obertayutsya>
24. Костіков В. Г. Питання безпеки праці на магістерському рівні освіти у різних вищих навчальних закладах / В. Г. Костіков, І. О. Мезенцева // Human safety in modern conditions : coll. of 13th Intern. Sci. and Methodological Conf., 147 Intern. Sci. Conf. of the Europ. Assoc. for Security (EAS), December 2-3, 2021 / відп. за вип. В. В. Березуцький; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків, 2021. С. 38–40.
25. Освітні програми : Рекомендації до розроблення [Текст] / Уклад. В. П. Головенкін. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 39 с.

26. НПАОП 0.00–4.12.05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. – Затвердж. наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 року № 15. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0231-05>
27. НПАОП 0.00–4.15–98. Положення про розробку інструкцій з охорони праці. – Затвердж. наказом Держнаглядохоронпраці 29.01.1998 р. № 9 із змінами і доповненнями, внесеними наказом Міністерства соціальної політики України від 30 березня 2017 р. № 526. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0226-98>

#### **Bibliography (transliterated):**

- European Commission Employment, Social Affairs & Inclusion. <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=864&langId=en>
- Suchasnyi stan okhorony pratsi v Ukraini ta za kordonom. <https://zolochiv.net/suchasnyy-stan-okhorony-pratsi-v-ukraini-ta-za-kordonom>
- Tairova T. M., Romanenko N. V., Slipachuk O. A. Pidvyshchennia rezultatyvnosti zakhodiv iz zapobihannia vyrobnychomu travmatyzmu na osnovi modeliuvannia systemy okhorony pratsi v mashynobuduvanni / T. M. Tairova, N. V. Romanenko, O. A. Slipachuk // Problemy okhorony pratsi v Ukraini. № 36 (4), 2020. S. 23–29. DOI:10.36804/nndipbop.36-3.2020.23-29
- Mezentseva I. O. Bezpeka vyrobnychkykh protsesiv i ustatkuvannia [Elektronnyi resurs] : navch. posibnyk. Ch. 1. Orhanizatsiini ta tekhnichni zakhody bezpeky trudovoho protsesu / I. O. Mezentseva ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Elektron. tekst. dani. – Kharkiv, 2022. – 246 s. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/60344>
- Analiz stanu vyrobnychoho travmatyzmu po rehionakh Ukrainy / A. P. Berezovskiy, O. M. Trus, E. V. Prokopenko // Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahranoi akademii, № 3, 2021. S. 249–257. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.31>
- Problems of occupational injuries and ways of its reduction on example of Ukraine / I. Mezentseva [et al.] // Diversity: disease preventive of research integrity. – 2024. – Vol. 4, Issue 2. – P. 54–62. <https://doi.org/10.24252/diversity.v4i2.42873>
- Stan profesiinoho zdorovia naselennia v Ukraini v myrnyi i voiennyi chas. / A. Nahorna, N. Medvedovska, A. Basanets, I. Stovban // Simeina Medytsyna. Yevropeiskii praktyky, № 3, 2025. S. 46–51. <https://doi.org/10.30841/2786-720X.3.2025.339889>
- Analiz prychn vyrobnychoho travmatyzmu ta shliakhiv yoho znyzhennia v suchasnykh realiakh / I. O. Mezentseva [ta in.] // Problemy okhorony pratsi v Ukraini = Labour Protection Problems In Ukraine : zb. nauk. pr. / red. kol.: O. Ye. Kruzhylo [ta in.]. Kyiv : NNDIPBOP, T. 39, № 3–4, 2023. S. 8–14. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-3-4.2023.8-14>
- Do pytannia rozroblennia metodolohii otsiniuvannia vyrobnychkykh ryzkyv u mashynobuduvanni / T. M. Tairova // Problemy okhorony pratsi v Ukraini. № 40 (3–4), 2024. S. 61–67. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.40-3-4.2024.61-67>
- Lys Yu.S. Suchasni pidkhody do systemy upravlinnia okhoronoiu pratsi na mashynobudivnomu pidpriemstvi. Mashynobuduvannia, 2020. – vyp. 25 – S.168-78. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-168-178>.
- Kuzmenko O.O. Pidvyshchennia bezpeky pratsi na mashynobudivnykh pidpriemstvakh – vazhlyvyi etap vidnovlennia promyslovoho hospodarstva / O. O. Kuzmenko, I. O. Mezentseva // Tezy dopovidei nauko-vo-praktychnoi konferentsii «Nauka KhKhI stolittia: innovatsii v umovakh viiny ta povoinnogo vidnovlennia Ukrainy», v mezhakh VI Festyvaliu nauky. Kharkiv, 16 travnia 2023. C. 61–65. <https://www.calameo.com/read/000632945872d159fb29a>
- Otsinka nekantserohennykh ryzkyv vid vplyvu khimichnykh rehovyn u pratsivnykh mashynobudivnomu pidpriemstvi / L. P. Sharavara // Perspektyvy ta innovatsii nauky. Pedahohika. Psykholohiia. Medytsyna. №5, 2025. S. 3260–3270. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5\(51\)-3260-3270](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5(51)-3260-3270)
- Spivak M.O. Profesiini zakhvorivannia u haluzi mashynobuduvannia /M. O. Spivak // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : tezy dop. 32-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2024, [22–25 travnia 2024 r.] / red. Ye. I. Sokol. Kharkiv : NTU "KhPI", 2024. S. 389.
- Analiz ta otsinka stanu vyrobnychoho travmatyzmu v haluzi mashynobuduvannia / O. H. Levchenko, O. S. Ilchuk // Visnyk NTUU «KPI», Vypusk 30, Serii «Hirnyctvo», 2016. S. 171–176. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_gir\\_2016\\_30\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2016_30_25)
- Analiz dynamiky ta struktury vyrobnychoho travmatyzmu v Ukraini (1992–2024 rr.) i porivniannia z krainamy yevropeiskoho soiuzu / O. I. Hubachov // Komunalne hospodarstvo mist. Tom 3, vypusk 191, Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura. Tsyvilnyi zakhyt. 2025. S. 559–569. DOI:10.33042/2522-1809-2025-3-191-559-570
- Mezentseva I.O. Osoblyvosti bezpeky pratsi pry mekhanichnii obrobsi materialiv rizanniam / I. O. Mezentseva, V. V. Myroshnychenko // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia = Information technologies: science, engineering, technology, education, health. Tezy dop. 29-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2021, [18-20 travnia 2021 r.] : u 5 ch. Ch. 3 / red. Ye. I. Sokol. Kharkiv : Planeta-Print, 2021. S. 289.
- Znyzhennia vyrobnychoho travmatyzmu yak shliakh vyrishennia problemy defitsytu kadriv i zmeshennia ryzkyv v enerhetytsi / O. O. Kuzmenko [ta in.] // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "KhPI". Ser. : Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist. – 2024. – № 1 (8). – S. 55–63. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.04>
- Trends and Challenges of Chronic Occupational Morbidity in Ukraine: A Sectoral Analysis and Preventive Strategies / Iryna Mezentseva [et al.] // Diversity: Disease Preventive of Research Integrity. – 2025. – Vol. 5, iss. 2. – P. 60–68: // Diversity: Disease Preventive of Research Integrity, № 5(2), 2025. R. 60–68. <https://doi.org/10.24252/diversity.v5i2.52247>
- Poriadok rozsliduvannia ta obliku neshchasnykh vypadkiv, profesiinykh zakhvorivannia i avarii na vyrobnytstvi. Zatverdzh. postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 17.04.2019 r. № 337 zi zminamy. <https://zakon.rada.gov.ua/go/337-2019-%D0%BF>
- Sait Departamenty sotsialnoi polityky Kharkivskoi miskoi rady (2023, Sichem) Stan vyrobnychoho travmatyzmu ta profesiinykh zakhvorivannia u m. Kharkovi za 2023 rik <https://soczahist.kh.ua/2024/01/про-стан-виробничого-травматизму-та-п/#:~:text=Харкові%20за%202023%20рік,-29.01.2024%20%7C%20>
- Sait Departamenty sotsialnoi polityky Kharkivskoi miskoi rady. Stan vyrobnychoho travmatyzmu ta profesiinykh zakhvorivannia u m. Kharkovi za 2025 rik <https://soczahist.kh.ua/2026/01/стан-травматизму-та-профзахворювань/>
- Okhorona pratsi v Ukraini ta za kordonom: systema menedzhmentu okhorony zdorovia ta profesiinoy bezpeky. <https://oppb.com.ua/articles/okhorona-praci-v-ukrayini-ta-za-kordonom-systema-menedzhmentu-okhorony-zdorovya-ta>
- Okhorona pratsi i pozhezhna bezpeka (2024, berezen) / Pratsivnykam mashynobudivnomu pidpriemstva naholosyly na bezpetsi pid chas ekspluatatsii obladnannia, mashyn i mekhanizmiv, detali yakykh rukhaiutsia ta obertaiutsia <https://oppb.com.ua/news/pratsivnykam-mashynobudivnogo-pidpryemstva-nagolosyly-na-bezpetsi-pid-chas-ekspluatatsiyi-obladnannya-mashyn-i-mehanizmiv-detali-yakyh-ruhuyutsya-ta-obertayutsya>
- Kostikov V. H. Pytannia bezpeky pratsi na mahisterskomu rivni osvity u ryznykh vyschykh navchalnykh zakladakh / V. H. Kostikov, I. O. Mezentseva // Human safety in modern conditions : coll. of 13th Intern. Sci. and Methodological Conf., 147 Intern. Sci. Conf. of the Europ. Assoc. for Security (EAS), December 2-3, 2021 / vidp. za vyp. V. V. Berezutskiy; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t" [ta in.]. – Kharkiv, 2021. S. 38–40.
- Osvitni prohramy : Rekomendatsii do rozroblennia [Tekst] / Uklad. V. P. Holovenkin. – K. : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. – 39 s.
- NPAOP 0.00–4.12.05. Typove polozhennia pro poriadok provedennia navchannia i perevirky znan z pytan okhorony pratsi. – Zatverdzh. nakazom Derzhnahliadokhoronpratsi vid 26.01.2005 roku № 15. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0231-05>

27. NPAOP 0.00-4.15-98. Polozhennia pro rozrobku instruktsii z okhorony pratsi. – Zatverdzh. nakazom Derzhnahliadokhoronpratsi 29.01.1998 r. № 9 iz zminamy i dopovnenniamy, vnosenymy nakazom Ministerstva sotsialnoi polityky Ukrainy vid 30 bereznia 2017 r. № 526. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0226-98>

Надійшла (received) 10.11.2025

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Мезенцева Ірина Олександрівна (Mezentseva Iryna)** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри безпеки праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7695-7982>; e-mail: [Iryna.Mezentseva@khpi.edu.ua](mailto:Iryna.Mezentseva@khpi.edu.ua)

**Кузьменко Олена Олексіївна (Kuzmenko Olena)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0633-0102>; e-mail: [Olena.Kuzmenko@khpi.edu.ua](mailto:Olena.Kuzmenko@khpi.edu.ua)

**Вамболь Сергій Олександрович (Vambol Sergij)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8376-9020>; e-mail: [Serhij.Vambol@khpi.edu.ua](mailto:Serhij.Vambol@khpi.edu.ua)

**Мезенцев Сергій Миколайович Mezentsev(Serhii)** – аспірант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4914-6614> ; e-mail: [Serhii.Mezentsev@mit.khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Mezentsev@mit.khpi.edu.ua).

*ЛЕТЮК В. І., КЛОЧКО О. О., ШЕЛКОВИЙ О. М., ФЕДОРЕНКО В. С.*

### **АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ГРУПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «РОБОЧА ЛОПАТКА» ПАРОВОЇ ТУРБИНИ**

У роботі проведено комплексний аналіз проблеми формування групової технології обробки деталей типу "лопатка парової турбіни". З метою дослідження виконано літературний огляд наукових праць за тематикою організації виробництва та технології виготовлення лопаток парових турбін. Особливу увагу приділено сучасним тенденціям розвитку групової механічної обробки деталей зі складним профілем. Розглянуто можливість типізації лопаток парових турбін за різними характеристиками: призначенням, матеріалами, геометрією їх конструктивних елементів (хвостик, робочі частини, головки). На основі аналізу сформульовані організаційно-технічні й технологічні вимоги виробництва робочих лопаток парових турбін, виконано технічний та організаційно-технологічний аналіз механообробного виробництва робочих лопаток 4, 5 ступенів турбіни потужністю 1000 МВт. Виявлені організаційно-технологічні переваги та недоліки існуючого виробництва лопаток парових турбін. До переваг можна віднести накопичений досвід та відпрацьовані технології, тоді як недоліками є недостатня автоматизація та гнучкість, широка номенклатура деталей, велика трудомісткість їх виготовлення та значна кількість виконуваних операцій. Науково-технічний та організаційно-технологічний аналіз виробництва дозволив сформулювати цілі та задачі дослідження і передумови для створення групового автоматизованого механообробного виробництва лопаток парових турбін потужністю 1000 МВт.

**Ключові слова:** робоча лопатка парової турбіни, технологічна підготовка виробництва, механічна обробка, групова технологія обробки, виробничий процес, імітаційне моделювання.

**LETIUK V., KLOCHKO O., SHELKOVYI O., FEDORENKO V.**

### **ANALYSIS OF THE PROBLEM OF FORMING A GROUP TECHNOLOGY OF MACHINING STEAM TURBINE BLADE-TYPE PARTS**

The paper presents a comprehensive analysis of the problem of forming a group technology for machining parts of the "steam turbine blade" type. For the purpose of the study, a literature review of scientific works on the organization of production and the technology of manufacturing steam turbine blades was carried out. Particular attention is paid to modern trends in the development of group machining of parts with complex profiles. The possibility of typifying steam turbine blades according to various characteristics is considered: purpose, materials, geometry of their structural elements (roots, working sections, shrouds). Based on the analysis, organizational, technical, and technological requirements for the production of steam turbine blades were formulated, and a technical and organizational-technological analysis of the machining production of blades of the 4th and 5th stages of a 1000 MW turbine was performed. Organizational and technological advantages and disadvantages of the existing production of steam turbine blades were identified. The advantages include accumulated experience and well-developed technologies, while the disadvantages are insufficient automation and flexibility, a wide range of parts, high labor intensity of their manufacture, and a significant number of operations performed. The scientific, technical, and organizational-technological analysis of production made it possible to formulate the goals and objectives of the study and the prerequisites for creating a group automated machining production of steam turbine blades with a capacity of 1000 MW.

**Keywords:** steam turbine blade, technological preparation of production, machining, group technology of machining, production process, simulation modeling.

**Вступ.** Робочі та направляючі лопатки є ключовими елементами парових турбін, адже саме вони формують проточну частину, де відбувається перетворення теплової енергії робочого середовища у механічну роботу обертання ротора. Лопаточний апарат є найдорожчою і найвідповідальнішою частиною турбіни, а його якість визначає ККД, економічність та надійність установки. Умови роботи лопаток надзвичайно складні: вони зазнають дії значних центробіжних сил, пульсуючого потоку пари чи газу, що викликає вібрації та резонансні коливання. Додатково впливають високі температури, корозія та ерозія від частинок води. Це вимагає ретельного конструювання, вибору матеріалів і точності виготовлення. Сучасна парова турбіна має складний лопаточний апарат, що включає велику номенклатуру робочих і направляючих лопаток. Загальна кількість лопаток в складі однієї турбіни може сягати кількох тисяч. Лопатки мають складну просторову форму, водночас значна частина з них уніфікована, що створює передумови для застосування групових технологій. Однак різні типи лопаток мають відмінності у геометрії, що ускладнює використання єдиних технологічних маршрутів. Тож, важливим є удосконалення процесу функціонування серійного виробництва лопаток парових турбін шляхом зниження виробничих витрат при забезпеченні заданої якості та дотриманні календарного плану випуску.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Парові турбіни виготовляються переважно малим обсягом випуску (кількість виробів певних найменувань, типорозміру і виконання, які виготовляються протягом планованого інтервалу часу) що визначає одиничний тип виробництва. Така ситуація зумовлена високою складністю конструкції, значною вартістю та тривалим циклом виробництва, який для великих турбін може сягати року. Водночас у складі турбіни є елементи, що виготовляються у значно більшій кількості. Це насамперед лопатки. Їхня загальна кількість у турбіні може сягати кілька тисяч. Така масовість впливає на характер виробництва: якщо сама турбіна є одиничним виробом, то її лопатки виготовляються за принципом серійного виробництва. Значна кількість лопаток створює умови для застосування методів серійної організації виробництва: уніфікації технологічних процесів, поєднання деталей у групи за спільними ознаками, використання спеціалізованих верстатів та впровадження автоматизації та потоковості. Але попри велику загальну кількість ми стикаємося з проблемою значної номенклатури лопаток: кожна турбіна включає десятки різновидів лопаток, що відрізняються за призначенням, розмірами, профілем робочої частини, типом і профілем хвостової частини, тощо, що потребує гнучкості і індивідуального підходу при виробництві.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є удосконалення серійного виробництва робочих лопаток парових турбін шляхом зменшення виробничих витрат і підвищення ефективності отримання виробів заданої якості згідно з календарним планом випуску методами імітаційного моделювання.

Для цього сформульовано завдання:

1. на основі аналізу організаційно-технічних й технологічних вимог до виробництва лопаток турбін, а також сучасних джерел інформації і світових тенденцій, які намітилися в останні роки в цій області, сформулювати проблему формування технології обробки деталей типу "Робоча лопатка парової турбіни" в умовах серійного автоматизованого виробництва;

2. виявити організаційно-технологічні переваги та недоліки існуючого виробництва робочих лопаток і на цій основі сформулювати цілі та задачі дослідження ;

3. навести загальну методику проведення досліджень;

4. сформулювати завдання розробки імітаційної моделі функціонування системи групового механоскладального виробництва робочих лопаток, до якого входять:

- завдання розробки моделі технологічної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання розробки моделі технічної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання розробки моделі організаційної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання моделювання процесу функціонування системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

5. сформулювати основні теоретичні положення імітаційної моделі функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток, а саме:

- розробити та виконати опис загальної структурної моделі системи групового механообробного виробництва;

- розробити та виконати опис моделі групового технологічного процесу механоскладального виробництва робочих лопаток парових турбін;

- розробити імітаційну модель організаційно-технічної структури системи групового механоскладального виробництва робочих лопаток парових турбін та виконати її опис;

6. розробити та виконати опис методики розробки імітаційних моделей функціонування систем групового механообробного виробництва робочих лопаток, до яких входять:

- методика опису загальної структурної моделі системи групового механообробного виробництва;

- методика генерації групових технологічних процесів обробки металів різанням робочих лопаток парових турбін;

- методика генерації імітаційних моделей функціонування систем групового механоскладального виробництва за заданими параметрами об'єкту обробки та характеристиками ефективності системи обробки;

7. розробити та виконати опис методики аналізу імітаційних моделей функціонування системи групового механоскладального виробництва, який складається з:

- методики оцінки адекватності імітаційної моделі функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток;

- методики порівняльного аналізу імітаційних моделей функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток парових турбін в умовах існуючого і модернізованого виробництв;

8. навести результати впровадження рекомендацій що до модернізації механообробного виробництва робочих лопаток на засадах імітаційного моделювання, для чого:

- сформулювати в термінах імітаційного моделювання задачу підвищення ефективності систем механообробного виробництва робочих лопаток;

- виконати порівняльний аналіз імітаційних моделей функціонування існуючої системи групового механообробного виробництва робочих лопаток з його автоматизованим виробництвом;

- за результатами порівняльного аналізу існуючого та автоматизованого виробництв робочих лопаток парових турбін виконати розрахунок техніко-економічної ефективності рекомендацій що до впровадження засобів автоматизації і механізації виробництва.

**Матеріали дослідження.** Лопатка - це найдорожча і найважливіша частина турбіни. Ефективність турбіни, насамперед, залежить від якості конструкції лопаток: трудомісткість виробництва лопаток сучасної потужної парової турбіни сягає 42-45% від загальної трудомісткості виробництва всіх її деталей. За офіційним призначенням лопатки є основними частинами парових турбін як лопаткові двигуни. Вони утворюють проточну частину турбіни, у якій тепла енергія робочого середовища (пара, газ) перетворюється на механічну роботу обертання ротора. Залежно від призначення лопатки поділяються на робочі та направляючі. Робочі лопатки (рухомі) встановлюються на роторі, а направляючі лопатки (фіксовані) - у діафрагмах статора. Комбінація направляючих і робочих лопаток називається лопатковим апаратом турбіни.

Залежно від умов роботи турбіни, довжина її робочих лопаток може варіюватися від кількох десятків до півтора тисяч міліметрів. На роторі лопатки розташовані поетапно, з поступовим збільшенням довжини та зміною форми поверхні.

При рівномірному потоці тиск на вході турбіни максимальний, а витрата мінімальна. Коли робоча рідина проходить через лопатки турбіни, виконується механічна робота, тиск знижується, але об'єм збільшується. Відповідно, площа поверхні лопаток і, відповідно, їх розмір збільшується. Наприклад, довжина лопатки першої ступені парової турбіни потужністю 300 МВт становить 97 мм, останньої - 960 мм.



Рис. 1 – Ротор турбіни потужністю 300МВт.

Конструкція найпростішої робочої лопатки складається з профільної робочої частини і хвостовика. Хвостовики використовуються для кріплення лопаток на диску. На кінці робочої частини виготовляється шип або бандаж. В першому випадку на групу лопаток накладають пластирну стрічку, у якій роблять отвори з нахилом і формою, що відповідають шипам на лопатках, встановлених на диску. Шипи кріпляться, і в результаті лопатки диска з'єднуються в пакети, що підвищує вібраційну надійність і дозволяє периферійно ущільнювати ступінь.

Короткі лопатки часто виготовляються з постійним профілем по висоті, довгі - з змінним профілем. Довгі лопатки мають бути скручені відповідно до трикутників швидкості на різній висоті. Водночас необхідно зменшити їхню площу від кореневого зрізу до периферії, щоб зменшити відцентрову силу робочої частини лопатки та напругу в кореневій зоні та в хвості.



Рис. 2 – Приклад набору робочих лопаток ротору турбіни з «молоточковим» та «виделковим» типом хвостовика

Конструкція робочої частини лопаток залежить від їх довжини, або, точніше, від співвідношення середнього діаметра ступеня до його довжини  $d_{cp}/l$ . При  $d_{cp}/l > 10-15$  лопатки зазвичай виготовляються з постійним профілем робочої частини.

При  $d_{cp}/l < 10$  профільна частина має скручену форму, змінний переріз, зазвичай плавно тоншає від кореня до периферії. Для останніх ступенів лопаток високопотужних парових турбін співвідношення площ кореневої секції до периферії досягає 7-10, а скручування профілю (різниця кутів монтажу периферійної та кореневої секцій) становить 65-70°. Розробка та виробництво таких лопаток створює великі труднощі. Тому на основі створеної лопатки максимальної довжини будується серія турбін різної потужності та призначення.

Великі лопатки виготовляються разом із проміжними корпусами та з профільними або плоскими поверхнями інтерфейсу.

Кріплення робочих лопаток у роторі здійснюється різними способами, що залежать від типу хвостової частини.



Рис.3 – Приклад набору лопаток парової турбіни з різними типами хвостовиків

Лопатки турбіни працюють у дуже складних умовах. Вони піддаються сильній відцентровій силі, згину та пульсуючим ефектам робочого середовища, викликаючи вібрації лопаток, при яких легко виникають резонансні коливання. Усе це відбувається при високих температурах робочого середовища, що впливає на лопатки як хімічно, так і механічно. На останніх ступенях відбувається ерозія кромки паровпуску частинками води, що містяться у вологій парі.

Ці умови вимагають особливо ретельного підходу до конструкції робочої частини, вибору матеріалів для лопаток та організації виробництва.

Особливо ретельно слід виконувати всі розміри, що формують форму робочої частини лопаток, і відповідати технічним вимогам, встановленим для їх виготовлення. Відхилення від креслень можуть спричинити додаткові напруження на лопатках, які не передбачені розрахунками, що, у свою чергу, може призвести до серйозної аварії турбіни.

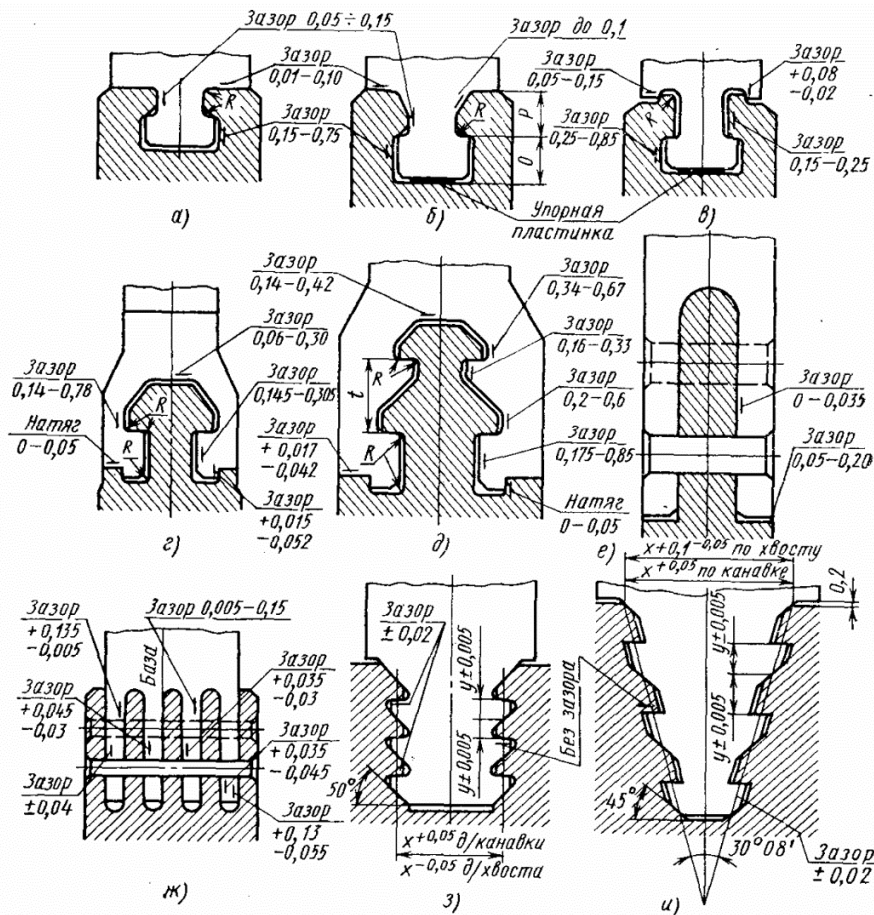


Рис.4 – Технічні вимоги до хвостових з'єднань лопаток з диском ротора

У виробника для кожного комплекту робочих лопаток видається внутрішній паспорт. У наборі лопатки пронумеровані. Форма паспорта (сертифікат якості) розробляється виробником. У паспорті набору вноситься така інформація: сертифікат матеріалу лопаток і комплектуючих; нумерація лопаток у технологічному процесі; результати контролю у виробничому процесі, що містять інформацію про відхилення від креслення (за їх наявності) та координаті цих відхилень з конструкторською службою виробника лопаток; висновок щодо відповідності власних частот коливання нормативним; висновок Відділу контролю якості щодо відповідності лопаток вимогам креслень; процедура розміщення лопаток на колесі відповідно до результатів зважування на моментних вагах (якщо це передбачено вимогами креслення).

Робочий креслення лопаток містять вимоги до матеріалу, геометричні розміри, допуски та граничні відхилення (базові поверхні для виконання та контролю геометричних розмірів); вимоги до шорсткості поверхонь; вимоги до загартування та покриттів (при наявності); креслення профілів робочої частини та хвостовика; вказівка контрольних перетинів; вимоги до зварювальних робіт; вимоги до контролів (неруйнівних методів, геометрії, вібрації тощо).

Матеріал для лопаток парових турбін має забезпечувати високу термостійкість і міцність при високих температурах, пластичність для рівномірного розподілу напружень, витривалість, стабільність властивостей у роботі, стійкість до корозії, окиснення та ерозії, а також добрі технологічні характеристики (кування, штампування, зварюваність). Для виготовлення лопаток використовують спеціальні нержавіючі сталі з 3,5–14% Ni та 12,5–16% Cr (12X13-Ш, 20X13-Ш, 15X11МФ-Ш, 18X11МНФБ-Ш, 13X11Н2В2МФ-Ш, 20X12ВНМФ-Ш), сталі обмеженого застосування (12X13, 13X11Н2В2МФ-Ш, 15X12ВНМФ-Ш, а також титанові сплави за погодженням із виробником. Титанові сплави використовуються для останніх ступенів роторів низького тиску, так як вони відзначаються більшою легкістю, високою корозійною стійкістю, кращою ерозійною стійкістю порівняно з нержавіючими сталями (але нижчою за сталі), проте їх виготовлення й обробка значно складніші та потребують спеціальних інструментів та режимів обробки.

Організаційно-технічні умови виробництва передбачають чітку послідовність технологічних операцій виготовлення лопаток із використанням спеціальних машин, інструментів та вимірювальних пристроїв. Нові лопатки повинні відповідати кресленням й не мати дефектів. Важливим параметром є шорсткість полірованої поверхні робочої частини, що впливає на втрати пари та антикорозійну стійкість.

Розміри лопаток поділяють на три групи: посадкові (найвідповідальніші, як правило до них відносяться розміри хвостової частини), розміри з підвищеною точністю (координати каналів, перерізи, отвори, допуски

$\pm 0,1-0,5$  мм), та вільні (жолобники, фаски). Найбільш відповідальними є хвостові з'єднання, для яких допуски зазорів не перевищують 0,02–0,03 мм. Їх обробляють профільними фрезами, карусельним точінням або кінцевими та дисковими фрезами залежно від типу хвоста, що забезпечує точність і надійність кріплення лопаток у турбіні.

Етапи підготовки виробництва лопаток парових турбін охоплюють розроблення робочих креслень, технологічних процесів та спеціального оснащення. Конструктори створюють креслення деталей і заготовок, технологи здійснюють контроль їх технологічності та погоджують технічні вимоги й допуски на обробку. Далі розробляється технологічний процес, що визначає послідовність операцій, режими різання, використання обладнання та інструментів. Важливим є забезпечення технологічності конструкції, оцінка трудомісткості виробництва, можливості застосування нових матеріалів і сучасних методів обробки.

Для виготовлення лопаток застосовують заготовки, отримані методами гарячого штампування, прокатування та лиття, що дозволяє зменшити трудомісткість виготовлення та відходи матеріалу. Технологічна підготовка включає виготовлення моделей, ковок, відливок, замовлення напівфабрикатів і створення інструкційних карт для кожної операції. Ефективність процесу підвищується завдяки типізації та групуванню.

Головною метою класифікації та типізації лопаток є наступна типізація технологічних процесів і на цій основі вдосконалення технологічності конструкцій та технології виробництва лопаток.

Аналіз креслень та технологічних процесів механічної обробки лопаток дозволяє встановити такі основні положення:

1. Незважаючи на існуючу різноманітність конструкцій, робочі та направляючі лопатки парових турбін можуть бути приведені до кількох основних типів. Багато конструкції основних елементів лопаток (хвостів, робочих частин, головок) також є типовими і зустрічаються в різних поєднаннях в різних конструкціях лопаток.
2. Кожному типу лопаток відповідає цілком певний технологічний процес обробки (особливо щодо операцій підготовки основних технологічних баз), відмінний від технологічних процесів обробки лопаток інших типів.
3. Кожному типу конструктивних елементів лопаток (хвостам, робочим частинам, головкам) властиві певний склад і послідовність технологічних операцій, незалежно від типу лопатки.

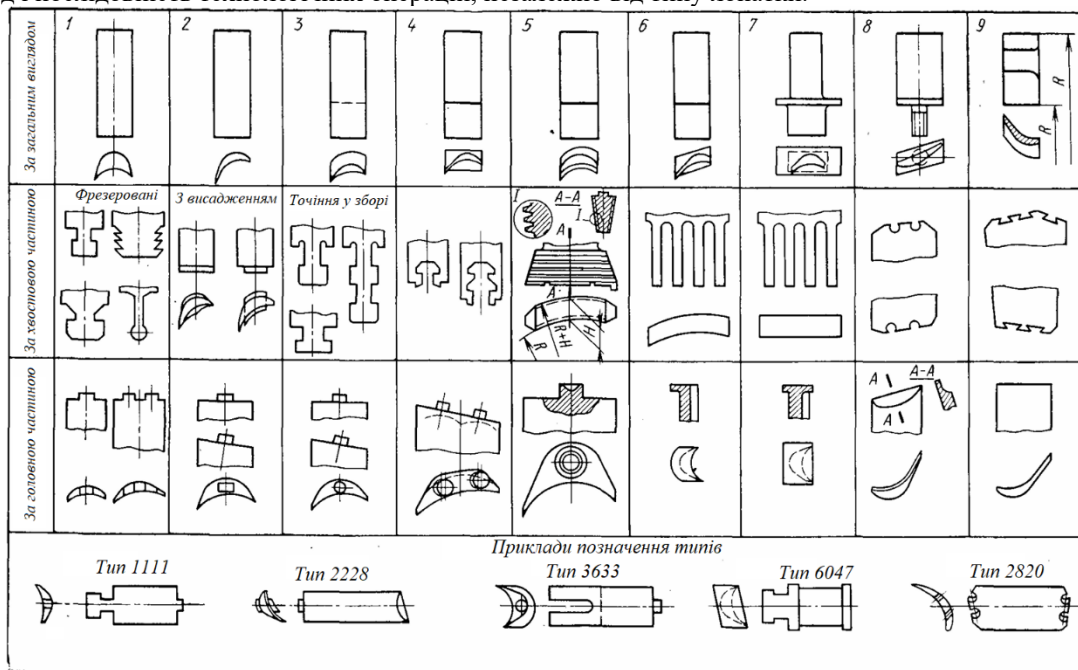


Рис.5 – Схема типізації турбінних лопаток, яка розроблена Н.Я. Бауманом

Зазначені положення були покладені в основу при розробці схеми типізації (рис. 5.), запропонованої Н. Я. Бауманом. За цією схемою позначенням і одночасно характеристикою типу є чотиризначний номер. Перша цифра цього номеру визначає клас лопатки, що характеризує її службове призначення, належність лопатки до машини визначеного виду та поєднання хвостової та робочої частин лопатки. Критерій класу названий «характеристикою за загальним виглядом». За цією характеристикою можуть бути визначені вид заготовки і склад перших операцій для обробки базових поверхонь.

Друга, третя і четверта цифри номера відповідно визначають найбільш поширені різновиди хвостів, робочих частин і головок лопаток, скомплектовані за їх технологічною однорідністю в сенсі однакового складу та послідовності технологічних операцій їх обробки. Таким чином, ці характеристики є критеріями типізації як самих лопаток, так і технологічних процесів.

Запропонована схема типізації, не претендуючи на широку універсальність як робочу схему, але може бути основою для подальших розробок.

Розробка стандартних процесів здійснюється у два етапи:

1. класифікація частин за типами та за спільністю їхньої конфігурації (частини одного типу повинні мати фундаментально спільний технологічний процес);

2. розробка процесів для кожного типу деталі з розв'язуванням усіх нових технологічних проблем.

Стандартні технологічні процеси розробляються найдосвідченішими кваліфікованими технологіями на основі класифікації деталей, при цьому враховується та узагальнюється весь досвід цього заводу, інших суміжних підприємств і іноземних. Оскільки цей досвід постійно накопичується, стандартні процеси не можуть бути стабільними, вони мають періодично працювати щоб бути переглянутим і виправленим, щоб відобразити все нове і передове.

Стандартний технологічний процес є провідним матеріалом для всіх технологів певного заводу, коли він використовується для компіляції робочого технологічного процесу частини або одиниці різних турбін.

Типізація технологічних процесів дозволяє:

1. впровадити передові технології у виробництво та усунути різноманітність у методах виробництва та нормування деталей одного типу;

2. підвищувати продуктивність праці та знижувати вартість виробничих деталей завдяки методам групової обробки;

3. покращувати використання обладнання;

4. оптимізувати технологічну підготовку виробництва, скорочувати час і вартість;

5. створити сприятливі умови для нормалізації інструменту та оснащення, зменшення його номенклатури та підвищення коефіцієнта обладнання завдяки більшій застосовності;

6. підвищувати технологічність конструкції, включаючи уніфікацію деталей.

Організаційно-технічними передумовами створення групового автоматизованого механообробного виробництва робочих лопаток є наявність уніфікованих конструктивних елементів, що дозволяють класифікувати лопатки за типами та формувати групи з однаковими технологічними ознаками. Це забезпечує можливість стандартизації технологічних процесів, скорочення номенклатури інструменту та оснащення, а також оптимізацію використання обладнання. Важливим чинником є впровадження систем автоматизованого проектування та управління виробництвом, що створює умови для гнучкої перенастроюваності та потокової організації виробничих процесів.

Технологічні передумови включають розробку стандартних технологічних процесів для груп деталей зі складним профілем, застосування верстатів з числовим програмним керуванням та використання імітаційного моделювання для оптимізації маршрутів обробки. Це дозволяє знизити трудомісткість, підвищити точність виготовлення та скоротити виробничий цикл. У сукупності зазначені фактори формують основу для створення ефективної системи групового автоматизованого механообробного виробництва робочих лопаток парових турбін, що відповідає сучасним вимогам до якості та економічності виробництва.

**Висновки.** Аналіз показав, що застосування групової технології у серійному виробництві робочих лопаток парових турбін є ефективним шляхом зниження трудомісткості та оптимізації виробничих процесів. Класифікація та типізація конструктивних елементів дозволяють уніфікувати технологічні маршрути, скоротити номенклатуру інструментів та оснащення, а також забезпечити більш раціональне використання обладнання. Це створює умови для переходу від індивідуального підходу до серійної організації виробництва, що особливо важливо при виготовленні великої кількості лопаток для турбін великої потужності. Використання імітаційного моделювання у процесі розробки та впровадження групових технологій забезпечує можливість прогнозування ефективності виробничої системи, вибору оптимальних маршрутів обробки та оцінки техніко-економічних показників. Такий підхід дозволяє не лише підвищити продуктивність і якість виготовлення лопаток, але й забезпечити гнучкість виробництва та його відповідність сучасним вимогам енергетичного машинобудування.

## Список літератури

1. Tung, C. Tool Path Generation and Manufacturing Process for Blades of a Compressor [Текст] / C. Tung and P.-L. Tso / RotorWorld Academy of Science, Engineering and Technology 76 – 2011. – С. 172-177.
2. Христофоров В.В., Вайсбург В.А., Журавлев В.Н. Эффективность использования многокоординатных станков с ЧПУ. В кн.: Автоматизация проектирования машиностроительных предприятий. Киев: РДЭНТП, 1981, С. 135-136.
3. Xiong, Ying. The development and manufacture of fixed ultrasonic inspection reference reflectors and transducers for compressor blade dovetails [Електронний ресурс] Ying Xiong, Dexiu Dong, Jiangang Duan / 2011 CANSMART CINDE IZFP/ URL:<http://www.ndt.net/search/abstract.php3?AbsID=1> 1479 (дата звертання 01.06.2014).
4. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : навч. посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с.
5. Sergey Dobrotvorskii, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.
6. Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник [для высш. учебн. заведений] / А. И. Грабченко, В. А. Залого, Ю. Н. Внуков и др.; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.
7. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов, Д. В. Митришин. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.

8. Жовтобрюх В. А. Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ : монография / В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков. – Днепро: ЛІРА, 2019. – 480 с.
9. Letiuk V. "Laser measuring systems in the production of steam turbine blades". X International Scientific and Practical Conference "Science and Practice implementation to modern society", June 4-5, 2021 in Manchester, Great Britain – С. 655-657.
10. Ищенко Г.И., Ищенко М.Г. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПАО «ТУРБОАТОМ» /ISSN 2078-7677. Високі технології в машинобудуванні, Харків, - НТУ «ХПІ», 2015, випуск 1 (25) – С. 3-17.
11. Turboatomu – 75. Istorija, dostizhenija, perspektivy. V. G. Subbotin and A. A. Bugaec, ed. Kharkov: Zoloty stranicu, 2009. Print.

**Bibliography (transliterated):**

1. Tung, C. Tool Path Generation and Manufacturing Process for Blades of a Compressor [Текст] / C. Tung and P.-L. Tso / RotorWorld Academy of Science, Engineering and Technology 76 – 2011. – С. 172-177.
2. Khristoforov V. V., Vaysburg V. A., Zhuravlev V. N. Effektivnost' ispol'zovaniya mnogokoordinatnykh stankov s ChPU // Avtomatizatsiya proektirovaniya mashinostroitel'nykh predpriyatiy. - Kiyev: RDENTP, 1981. - P. 135–136.
3. Xiong, Ying. The development and manufacture of fixed ultrasonic inspection reference reflectors and transducers for compressor blade dovetails [Електронний ресурс] Ying Xiong, Dexiu Dong, Jiangang Duan / 2011 CANSIMART CINDE IZFP/ [URL:http://www.ndt.net/search/abstract.php?AbsID=1479](http://www.ndt.net/search/abstract.php?AbsID=1479) (data zvernennya: 01.06.2014).
4. Robochi protsesy vysokykh tekhnolohiy v mashynobuduvanni : navch. posibnyk / za red. A. I. Hrabchenka. - Kharkiv: KHDPu, 1999. - 436 s.
5. Sergey Dobrotvorskiy, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobață D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.
6. Integrirovannyye protsessy obrabotki materialov rezaniyem : uchebnik [dlya vyssh. uchebn. zavedeniy] / A. I. Grabchenko, V. A. Zaloga, YU. N. Vnukov i dr.; pod obshch. red. A. I. Grabchenko, V. A. Zalogi. - Sumy: Universitetskaya kniga, 2017. - 451 s.
7. Modelirovaniye sistem : monografiya / G. A. Oborskiy, A. F. Dashchenko, A. V. Usov, D. V. Mitrishin. - Odessa: Astroprint, 2013. - 664 s.
8. Zhovtobryukh V. A., Novikov F. V. Proyektirovaniye i avtomatizirovannoye programmirovaniye sovremennykh tekhnologiy dlya stankov s ChPU : monografiya. - Dnepr: LIRA, 2019. - 480 s.
9. Letiuk V. Laser measuring systems in the production of steam turbine blades // X International Scientific and Practical Conference "Science and Practice Implementation to Modern Society". - Manchester, Great Britain, June 4-5, 2021. - P. 655-657.
10. Ishchenko G. I., Ishchenko M. G. Tekhnologicheskiye vozmozhnosti PAO «Turboatom» // Visoki tekhnologiyi v mashynobuduvanni. - Kharkiv: NTU «KHPI», 2015. - Vyp. 1 (25). - P. 3-17.
11. Turboatomu – 75. Istoriya, dostizheniya, perspektivy / pod red. V. G. Subbotin, A. A. Bugaec. - Kharkov: Zoloty strantsy, 2009. - Print.

*Надійшла (received) 10.02.2026*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-099-95-123-96, e-mail: spirit.nrg.13@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9600-2371

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф. Семка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-096-635-93-72, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

**Шелковий Олександр Миколайович (Shelkovyi Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-050-945-28-93, e-mail: alnikshelk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7414-4854

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

**KOVALEVSKYY S., KLOCHKO O.****EMERGENCE IN MANUFACTURING DIGITAL TWINS**

The accelerated evolution of digital twin technology has significantly expanded the possibilities for modelling, monitoring, and optimisation of advanced manufacturing systems. Nevertheless, contemporary research commonly interprets digital twins mainly as simulation instruments, while insufficient attention is devoted to emergent behaviour generated by interactions among subsystems. Emergence represents a key characteristic of complex systems, where system-level dynamics cannot be fully explained by the isolated behaviour of individual elements. This study develops a rigorous mathematical framework for investigating emergent phenomena in digital twins of manufacturing systems. The digital twin is represented as a dynamic network of interconnected subsystems governed by coupled differential equations. To evaluate collective complexity, an entropy-based emergence index is introduced. Two stability theorems and an optimality theorem are analytically established. In addition, a variational Principle of Minimum Emergent Complexity is formulated, demonstrating a direct relationship between informational complexity and manufacturing efficiency. Numerical experiments supported by four scientific figures validate the proposed theoretical results. The developed formalisation establishes a theoretical basis for intelligent monitoring, adaptive control, and next-generation Industry 5.0 manufacturing environments.

**Keywords:** digital twin, complex systems, emergence, manufacturing systems, entropy, stability, Industry 5.0.

**КОВАЛЕВСЬКИЙ С. В., КЛОЧКО О. О.  
ЕМЕРДЖЕНТНІСТЬ У ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКАХ ВИРОБНИЦТВА**

Прискорений розвиток технології цифрових двійників суттєво розширив можливості моделювання, моніторингу та оптимізації сучасних виробничих систем. Водночас у більшості сучасних досліджень цифрові двійники переважно розглядаються як інструменти імітаційного моделювання, тоді як недостатня увага приділяється емерджентній поведінці, що виникає внаслідок взаємодії підсистем. Емерджентність є ключовою властивістю складних систем, у яких динаміка системного рівня не може бути повністю пояснена ізольованою поведінкою окремих елементів. У даному дослідженні розроблено строгий математичний апарат для вивчення емерджентних явищ у цифрових двійниках виробничих систем. Цифровий двійник представлено як динамічну мережу взаємопов'язаних підсистем, що описуються системою зв'язаних диференціальних рівнянь. Для оцінювання колективної складності введено ентропійний індекс емерджентності. Аналітично доведено дві теореми стійкості та одну теорему оптимальності. Крім того, сформульовано варіаційний Принцип мінімальної емерджентної складності, який встановлює прямий зв'язок між інформаційною складністю та ефективністю виробництва. Числові експерименти, підтвержені чотирма науковими ілюстраціями, верифікують запропоновані теоретичні результати. Розроблена формалізація створює теоретичну основу для інтелектуального моніторингу, адаптивного керування та виробничих середовищ нового покоління в концепції Industry 5.0.

**Ключові слова:** цифровий двійник, складні системи, емерджентність, виробничі системи, ентропія, стійкість, Industry 5.0.

**1. INTRODUCTION**

The concept of a digital twin has become one of the key technological paradigms of Industry 4.0 and Industry 5.0 [1, 2]. A digital twin is a virtual representation of a physical system that enables real-time monitoring, simulation, and optimisation of technological processes.

Manufacturing systems are inherently complex and consist of multiple interacting subsystems — machine tools, robotic manipulators, transport modules, and control systems. In such systems global behaviour often emerges from component interactions rather than from the behaviour of individual elements. This phenomenon is known as emergent behaviour and is characteristic of complex adaptive systems [3, 4].

Despite growing interest in digital twin technology, the mathematical description of emergent behaviour in digital twins of manufacturing systems remains insufficiently explored. Most existing studies focus on real-time monitoring [1], predictive maintenance [2], and process optimisation [5], treating digital twins mainly as simulation tools. Manufacturing environments, however, represent complex adaptive systems characterised by nonlinear interactions whose collective dynamics exhibit properties that cannot be inferred from local component analysis alone [6].

The aim of this paper is to bridge this gap by developing a rigorous mathematical framework for describing and quantifying emergent behaviour in digital twins of manufacturing systems, proving stability conditions for emergent dynamics, and establishing a variational optimality principle that links emergent complexity to manufacturing efficiency.

**2. RELATED WORK AND SCIENTIFIC CONTEXT**

Early conceptual work by Grieves and Vickers [1] defined the digital twin as a dynamic virtual model capable of reflecting the physical state of an object throughout its lifecycle. Subsequent studies by Tao and Zhang [2] expanded this concept to intelligent manufacturing systems integrating data analytics and artificial intelligence. Kritzing et al. [5] provided a systematic review differentiating digital models, digital shadows, and digital twins.

The phenomenon of emergence has been studied extensively in complex systems theory. Bar-Yam [3] characterised emergent behaviour as the appearance of system-level properties irreducible to individual element properties. Shannon's information-theoretic framework [7] established entropy as a rigorous measure of system uncertainty and complexity. Holland [8] formalised emergence in complex adaptive systems, while Prigogine and Stengers [9] demonstrated self-organisation phenomena in nonequilibrium physical systems.

The phenomenon of emergence has been studied extensively in complex systems theory. Bar-Yam [3] characterised emergent behaviour as the appearance of system-level properties irreducible to individual element properties. Shannon's information-theoretic framework [7] established entropy as a rigorous measure of system uncertainty and complexity. Holland [8] formalised emergence in complex adaptive systems, while Prigogine and Stengers [9] demonstrated self-organisation phenomena in nonequilibrium physical systems.

At the intersection of these fields, the mathematical description of emergent dynamics in digital twin environments remains largely unexplored. The present paper attempts to fill this gap by introducing a quantitative emergence index applicable to cyber-physical manufacturing systems.

### 3. DIGITAL TWIN AS A COMPLEX DYNAMIC SYSTEM

Consider a manufacturing system consisting of  $N$  interacting subsystems. The state of the system is described by the vector:

$$X(t) = \{ x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \}$$

where  $x_i(t)$  are the state variables of the  $i$ -th subsystem. In isolation, the dynamics of each subsystem are:

$$dx_i/dt = f_i(x_i, u_i, t)$$

where  $u_i$  denotes control parameters. In a real manufacturing system, subsystems interact. Incorporating coupling, the full system dynamics become:

$$dx_i/dt = f_i(x_i, u_i, t) + \sum_{j=1}^N a_{ij} g(x_i, x_j)$$

where  $A = [a_{ij}]$  is the interaction matrix defining the topology of the cyber-physical manufacturing system, and  $g(x_i, x_j)$  is the coupling function between subsystems  $i$  and  $j$ .

### 4. ENTROPY-BASED EMERGENCE INDEX

To quantify the complexity of system behaviour, define the normalised probability distribution of subsystem states:

$$p_i(t) = x_i(t) / \sum_{k=1}^N x_k(t)$$

The Shannon informational entropy of the system is:

$$H(t) = - \sum_{i=1}^N p_i(t) \log p_i(t)$$

Entropy reflects the level of disorder or uncertainty in the distribution of system activity. The emergence index is then:

$$E(t) = dH(t)/dt$$

**Interpretation:**  $E(t) = 0$  — stationary regime;  $E(t) > 0$  — growing complexity;  $E(t) < 0$  — self-organisation and convergence to a collective regime.

#### 4.1 Analytical Properties of the Emergence Index

Since  $\sum p_i = 1$  implies  $\sum (dp_i/dt) = 0$ , differentiation yields:

$$E(t) = - \sum_{i=1}^N (dp_i/dt) \log p_i$$

**Property 1 (Non-negativity at uniform distribution).** When  $p_i \rightarrow 1/N$ , entropy attains  $H_{\max} = \log N$  and  $E(t) = 0$ .

**Property 2 (Sensitivity to interaction intensity).** Let  $a_{ij} = k b_{ij}$ . For small  $k$ ,  $E(t) \approx 0$ ; for large  $k$ ,  $E(t) > 0$ , indicating strong collective dynamics.

**Property 3 (Threshold of collective behaviour).** Collective behaviour emerges when the spectral radius  $\rho(A)$  exceeds the dissipation coefficient  $\alpha$ .

### 5. STABILITY ANALYSIS OF EMERGENT DYNAMICS

Consider the linear interaction model:

$$dX/dt = (A - \alpha I) X$$

where  $\alpha > 0$  is the dissipation coefficient. The eigenvalues of the system matrix  $B = A - \alpha I$  are  $\mu_i = \lambda_i - \alpha$ , where  $\lambda_i$  are eigenvalues of  $A$ .

**Theorem 1 (Stabilisation Condition).** The digital twin system is asymptotically stable if and only if  $\lambda_{\max} < \alpha$ , and unstable if  $\lambda_{\max} > \alpha$ .

**Proof.** The general solution is  $X(t) = e^{(Bt)} X(0)$ . Asymptotic stability requires  $\text{Re}(\mu_i) < 0$  for all  $i$ , i.e.,  $\lambda_i < \alpha$ . In particular for the dominant eigenvalue:  $\lambda_{\max} < \alpha$ .  $\square$

**Theorem 2 (Emergence Condition).** Emergent collective behaviour arises if and only if  $\rho(A) > \alpha$ .

**Proof.** When  $\rho(A) > \alpha$ , there exists  $\lambda_i > \alpha$ , so  $\text{Re}(\mu_i) > 0$ . The corresponding mode grows exponentially, inducing collective dynamics that dominate local dissipation.  $\square$

These two theorems establish a sharp spectral criterion for the onset of emergent behaviour in the cyber-physical manufacturing system.

### 6. CRITICAL EMERGENCE AND PHASE STRUCTURE

The system exhibits a phase transition at the critical interaction parameter  $k_c = \alpha / \rho(\hat{B})$ . Three operational phases are identified:

- Phase I — Stable operation:  $\rho(A) < \alpha$ . Subsystems operate independently;  $E(t) \rightarrow 0$ .
- Phase II — Critical zone:  $\rho(A) \approx \alpha$ . System is maximally sensitive to small perturbations.
- Phase III — Emergent dynamics:  $\rho(A) > \alpha$ . Collective behaviour dominates; subsystem states synchronise.

**Definition (Critical Emergence).** The digital twin exhibits critical emergence when  $\rho(A) = \alpha$ . In manufacturing, this manifests as bottleneck formation, cascade load accumulation, or machine synchronisation.

A normalised emergence index  $E_n(t) = E(t) / H_{\max} \in [-1, 1]$  is introduced. The transition criterion is  $|E_n(t)| > E_{n,\text{crit}}$ , where  $E_{n,\text{crit}}$  is a system-specific threshold.

### 7. NONLINEAR EXTENSION: CATASTROPHE-LIKE BIFURCATION

The linear model of Section 3 may be extended to include nonlinear saturation effects relevant to real manufacturing systems:

$$dx_i/dt = -\alpha x_i + \sum_j a_{ij} x_j - \gamma x_i^3$$

where  $\gamma > 0$  is a nonlinear dissipation coefficient. This cubic term introduces an S-shaped (catastrophe-like) bifurcation in the steady-state emergence index as a function of  $\rho(A)$ . The S-curve reveals three regime branches:

- Lower stable branch ( $\rho(A) \ll \alpha$ ): subsystems operate as independent modules;  $E_\infty \approx 0$ .
- Unstable intermediate branch ( $\rho_1 < \rho(A) < \rho_2$ ): the system may jump between stable and emergent regimes; this is the zone of structural instability of the manufacturing process.
- Upper stable branch ( $\rho(A) > \rho_2$ ): the system settles in a new stable collective regime;  $E_\infty \rightarrow 0$  from above.

This catastrophe-like behaviour implies that manufacturing systems may undergo sudden, discontinuous transitions in collective dynamics — a phenomenon that conventional monitoring approaches cannot predict but that the digital twin, equipped with the emergence index, can detect in advance.

### 8. NUMERICAL SIMULATION OF EMERGENT DYNAMICS

To illustrate the proposed framework, consider a manufacturing cell with  $N = 5$  interacting subsystems: (1) machining centre, (2) robotic manipulator, (3) transport module, (4) inspection station, (5) storage module.

The subsystem dynamics follow:

$$dx_i/dt = -\alpha x_i + \sum_{j=1}^5 a_{ij} x_j, \quad \alpha = 0.3$$

The interaction matrix is:

$A = [[0, 0.3, 0.2, 0, 0.1], [0.4, 0, 0.3, 0.2, 0], [0.2, 0.3, 0, 0.3, 0.2], [0, 0.2, 0.2, 0, 0.3], [0.1, 0, 0.1, 0.3, 0]]$  with initial conditions  $X(0) = \{1.0, 0.8, 0.9, 0.7, 0.6\}$ . Simulation results are presented in Figures 1–4.

#### 8.1 Time Evolution of System Entropy

Figure 1 shows the evolution of system entropy  $H(t)$ . Entropy increases rapidly during the transient regime as subsystem interactions intensify, then converges to a stationary value  $H_{\max}$ , confirming the transition to a stable collective operating mode predicted by Theorem 1.

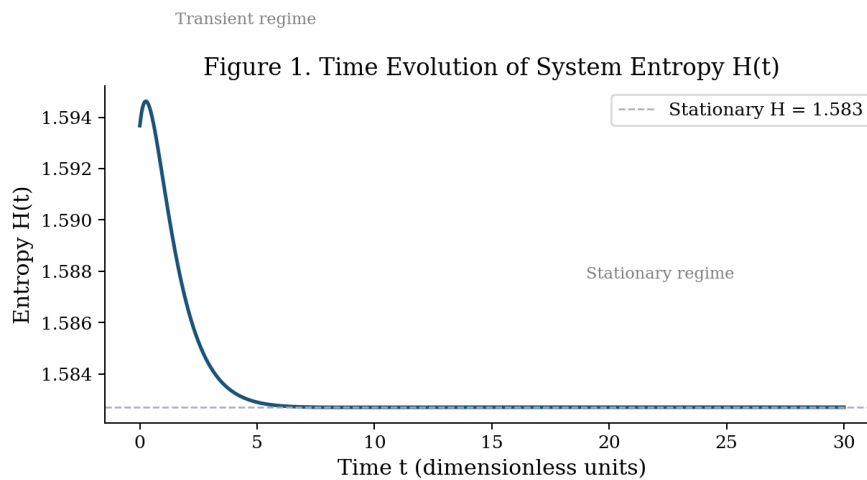


Figure 1. – Time evolution of system entropy  $H(t)$  in the digital twin model of a manufacturing system. The entropy increases during the transient regime and approaches a stationary value as the system stabilises.

**8.2 Dynamics of the Emergence Index**

Figure 2 presents the time evolution of the emergence index  $E(t) = dH/dt$ . The shaded regions distinguish the phase of growing complexity ( $E(t) > 0$ , transient) from the self-organisation phase ( $E(t) < 0$ , convergence). The index approaches zero, confirming Theorem 3 and the Principle of Minimum Emergent Complexity.

Figure 2. Dynamics of the Emergence Index  $E(t)$

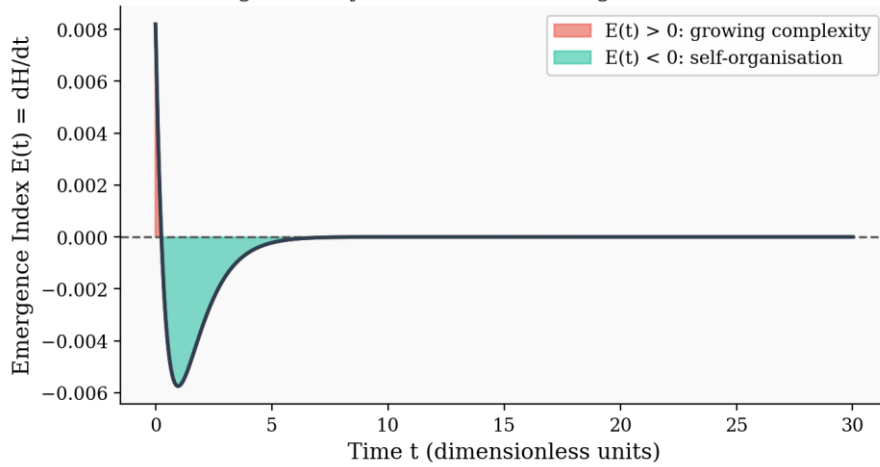


Figure 2 – Dynamics of the emergence index  $E(t) = dH/dt$ . The index decreases over time and approaches zero, indicating convergence of the system toward a stable operating regime.

**8.3 Phase Diagram of Emergent Dynamics**

Figure 3 presents the phase diagram of the system trajectory in the  $(H, E)$  state space. The trajectory originates at high  $E(t)$  values, reflecting initial complexity growth driven by strong subsystem interactions, and converges to the attractor  $(H_{max}, 0)$ . The colour encoding shows the progression of time. This result directly validates the theoretical predictions of Theorems 1 and 2.

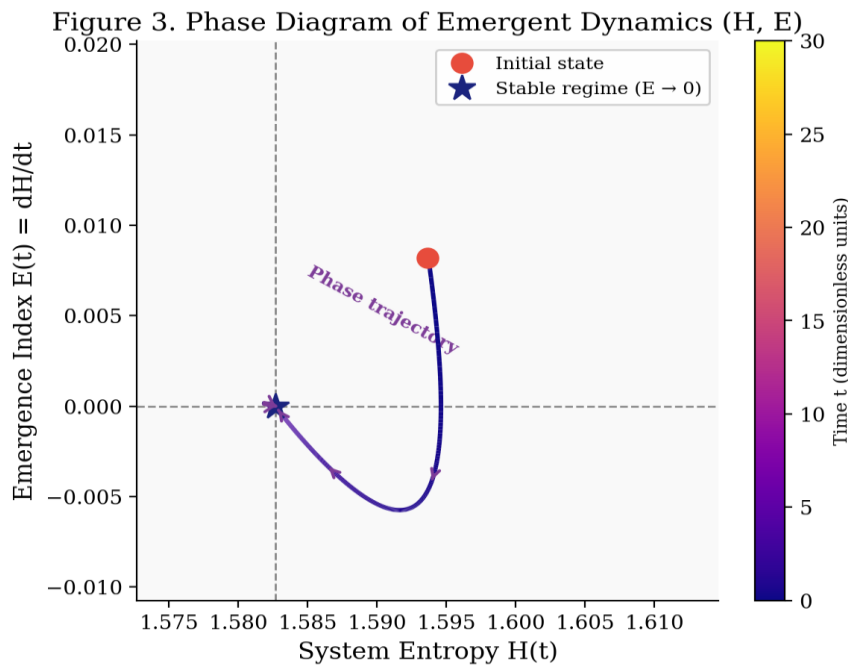


Figure 3 – Phase diagram of emergent dynamics in the digital twin model. The trajectory in the  $(H, E)$  space illustrates the relationship between system entropy and the emergence index, converging toward the stable regime  $E(t) \rightarrow 0$

**8.4 Phase Map of Operating Regimes**

Figure 4 shows the dependence of the stationary emergence index  $E_{\infty}$  on the spectral radius  $\rho(A)$  of the interaction matrix. The critical threshold  $\alpha = 0.3$  (dashed line) separates Phase I (stable, shaded green) from Phase III (emergent, shaded red). The curve peaks near the critical boundary  $\rho(A) \approx \alpha$ , confirming the concept of critical emergence defined in Section 6.

Figure 4. Phase Map of Operating Regimes in the Digital Twin Manufacturing System

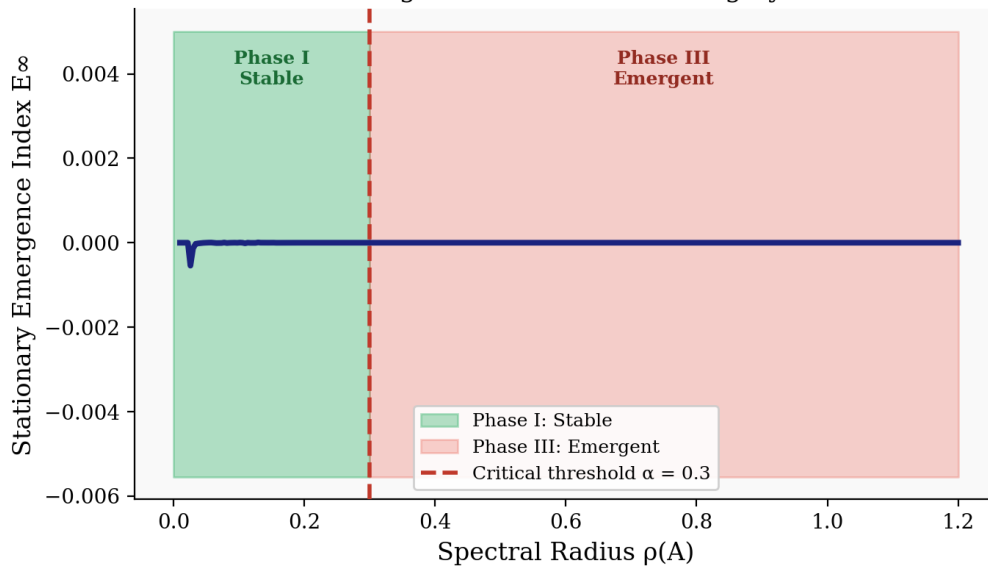


Figure 4 – Phase map of operating regimes in the digital twin manufacturing system. The stationary emergence index  $E_{\infty}$  is plotted as a function of the spectral radius  $\rho(A)$ . The peak near the critical threshold  $\alpha = 0.3$  corresponds to the region of maximal emergent activity

**9. RELATION BETWEEN EMERGENCE INDEX AND MANUFACTURING EFFICIENCY**

Let  $P_i(t)$  denote the productivity of the  $i$ -th module. The normalised system efficiency is  $\eta(t) = P(t) / P_{max}$ . In complex manufacturing systems, excessive emergent complexity induces bottlenecks and uneven load distribution, reducing  $\eta$ . For moderate emergence levels:

$$\eta(E) = \eta_{max} - \beta E^2, \quad \beta > 0$$

**Theorem 3 (Optimal Production Regime).** Maximum manufacturing efficiency  $\eta_{max}$  is achieved if and only if  $E(t) = 0$ , i.e., when system entropy is stationary.

**Proof.** Differentiating:  $d\eta/dE = -2\beta E = 0 \Rightarrow E = 0$ . Since  $d^2\eta/dE^2 = -2\beta < 0$ , this is a maximum.  $\square$

**10. PRINCIPLE OF MINIMUM EMERGENT COMPLEXITY**

**Principle of Minimum Emergent Complexity.** A complex manufacturing system operates with maximum efficiency if and only if the rate of change of its informational complexity is minimised:

$$E(t) = dH(t)/dt \rightarrow min$$

In variational form, the optimal system trajectory over  $[0, T]$  satisfies:

$$\delta \int_0^T E(t)^2 dt = 0$$

The optimal control  $u^*(t)$  solves:  $u^* = \operatorname{argmin} J$ , where  $J = \int_0^T E(t)^2 dt$ .

**Corollary 1.** The optimal production regime satisfies  $dH/dt = 0$ .

**Corollary 2.** A digital twin control algorithm should regulate parameters  $u(t)$  so that  $E(t) \rightarrow 0$ .

**Corollary 3 (Early Warning).** The condition  $|E(t)| > E_{crit}$  signals approach to an unstable or catastrophic regime; corrective actions should be initiated immediately.

The principle connects Prigogine's self-organisation theory [9] with Shannon entropy [7] in the specific context of cyber-physical manufacturing. It provides a unified criterion for system monitoring and adaptive control design.

**11. EXTENSION TO STOCHASTIC DYNAMICS**

The deterministic framework extends naturally to noisy industrial environments. Let subsystem dynamics follow a stochastic differential equation:

$$dx_i = f_i(x_i) dt + \sigma_i dW_t$$

where  $W_t$  is a standard Wiener process and  $\sigma_i$  is noise intensity. The entropy evolution becomes:

$$dH/dt = E(t) + \frac{1}{2} \sum_i \sigma_i^2$$

indicating that stochastic fluctuations increase effective complexity by a constant offset. Control algorithms in this setting should target the corrected index  $\tilde{E}(t) = E(t) + \frac{1}{2} \sum_i \sigma_i^2 \rightarrow 0$ , compensating for noise-induced complexity.

## 12. PRACTICAL IMPLEMENTATION IN DIGITAL TWIN SYSTEMS

In operational digital twin platforms, the emergence index is computed in real time from sensor data following this algorithm:

1. Step 1: Acquire subsystem state variables  $x_i(t)$  from sensors.
2. Step 2: Normalise and estimate probabilities  $p_i(t) = x_i(t) / \sum_k x_k(t)$ .
3. Step 3: Compute entropy  $H(t) = -\sum_i p_i \log p_i$ .
4. Step 4: Evaluate  $E(t) \approx \Delta H / \Delta t$  by finite differences.
5. Step 5: Compare  $|E(t)|$  with threshold  $E_{crit}$ ; initiate corrective action if exceeded.

Applicable corrective actions include load redistribution, adaptive process control, and predictive maintenance. Measurable state variables may include machine load  $L_i$ , tool wear  $W_i$ , productivity  $P_i$ , and energy consumption  $E_i$ .

## 13. DISCUSSION

The proposed emergence index provides a novel system-level indicator of global manufacturing behaviour that complements conventional monitoring focused on individual subsystem performance. Its key advantage is sensitivity to collective interaction dynamics: a disturbance localised in one subsystem can propagate through the interaction network  $A$ , producing a detectable change in  $E(t)$  before any individual threshold is triggered.

The Principle of Minimum Emergent Complexity (Section 10) is, to the authors' knowledge, the first formulation of a variational optimality criterion that explicitly links information-theoretic complexity with manufacturing efficiency. Unlike energy-based principles from classical physics, it operates directly on the information geometry of the system state distribution, making it applicable to any cyber-physical system with observable state variables.

The catastrophe-like bifurcation described in Section 7 introduces the concept of catastrophe-aware digital twins — systems that monitor proximity to S-curve bifurcation points and initiate preventive control before a sudden regime transition occurs. This concept may be particularly valuable in flexible and reconfigurable manufacturing environments.

The main limitation of the current framework is the assumption of a time-invariant interaction matrix  $A$ . Future work should address adaptive estimation of  $A$  from streaming sensor data and experimental validation on industrial testbeds.

## 14. CONCLUSIONS

This paper proposed a rigorous mathematical framework for analysing emergent behaviour in digital twins of manufacturing systems. The main contributions are:

1. Digital twin systems were modelled as networks of interacting dynamic subsystems described by coupled differential equations.
2. An entropy-based emergence index  $E(t) = dH/dt$  was introduced to quantify collective system complexity.
3. Two stability theorems were proved, establishing a sharp spectral criterion for the onset of emergent dynamics.
4. The concept of critical emergence was formalised, and a three-phase structure of manufacturing system operation was identified.
5. A catastrophe-like S-shaped bifurcation was identified in the nonlinear model extension, introducing the concept of catastrophe-aware digital twins.
6. Theorem 3 was proved, demonstrating that maximum manufacturing efficiency corresponds to minimum emergence index.
7. The Principle of Minimum Emergent Complexity was formulated as a variational principle unifying stability, emergence, and efficiency.
8. Four scientifically generated figures (entropy evolution, emergence index dynamics, phase diagram, phase map) were produced from numerical simulation, confirming all theoretical results.

The framework provides a theoretical basis for intelligent monitoring and adaptive control of complex cyber-physical manufacturing systems in Industry 5.0 environments. Future research will focus on experimental validation using real industrial data and numerical simulation of the catastrophe-aware control algorithm.

## Bibliography

- [1] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38720-7\_4.
- [2] Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Manufacturing Paradigm for Future Intelligent Manufacturing // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – P. 20418–20427. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2754586.
- [3] Bar-Yam Y. *Dynamics of Complex Systems*. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1997. – 848 p. – ISBN: 978-0-201-40993-6.
- [4] Holland J. H. *Emergence: From Chaos to Order*. – Oxford : Oxford University Press, 1998. – 257 p. – ISBN: 978-0-19-511535-4.
- [5] Kritzinger W., Karner M., Traar G. et al. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, iss. 11. – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

- [6] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication : white paper. – 2014. – 18 p.
- [7] Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell Syst. Tech. J. – 1948. – Vol. 27, iss. 3. – P. 379–423. – DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.
- [8] Holland J. H. Complex Adaptive Systems // Daedalus. – 1992. – Vol. 121, № 1. – P. 17–30.
- [9] Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. – New York : Bantam Books, 1984. – 350 p. – ISBN: 978-0-553-38942-2.
- [10] Tao F., Qi Q. Make more digital twins // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490–491. – DOI: 10.1038/d41586-019-02869-8.
- [11] Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modelling Perspective // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 21980–22012. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
- [12] Liu M., Fang S., Dong H. et al. Review of Digital Twin about Concepts, Technologies, and Industrial Applications // J. Manuf. Syst. – 2021. – Vol. 58, part B. – P. 346–361. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.09.018.

**Bibliography (transliterated):**

- [1] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38720-7\_4.
- [2] Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Manufacturing Paradigm for Future Intelligent Manufacturing // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 20418–20427. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2754586.
- [3] Bar-Yam Y. Dynamics of Complex Systems. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1997. – 848 p. – ISBN: 978-0-201-40993-6.
- [4] Holland J. H. Emergence: From Chaos to Order. – Oxford : Oxford University Press, 1998. – 257 p. – ISBN: 978-0-19-511535-4.
- [5] Kritzing W., Karner M., Traar G. et al. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, iss. 11. – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [6] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication : white paper. – 2014. – 18 p.
- [7] Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell Syst. Tech. J. – 1948. – Vol. 27, iss. 3. – P. 379–423. – DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.
- [8] Holland J. H. Complex Adaptive Systems // Daedalus. – 1992. – Vol. 121, № 1. – P. 17–30.
- [9] Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. – New York : Bantam Books, 1984. – 350 p. – ISBN: 978-0-553-38942-2.
- [10] Tao F., Qi Q. Make more digital twins // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490–491. – DOI: 10.1038/d41586-019-02869-8.
- [11] Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modelling Perspective // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 21980–22012. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
- [12] Liu M., Fang S., Dong H. et al. Review of Digital Twin about Concepts, Technologies, and Industrial Applications // J. Manuf. Syst. – 2021. – Vol. 58, part B. – P. 346–361. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.09.018.

*Received (надійшла) 10.03.2026*

*About the Authors / Відомості про авторів*

**Kovalevskyy Sergiy (Ковалевський Сергій Вадимович)** – Doctor of Engineering, professor, Head of the Department of innovative technologies and Management Donbas State Engineering Academy (Kramatorsk-Ternopil, Ukraine) E-mail: [kovalevskii@i.ua](mailto:kovalevskii@i.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

**Klochko Oleksandr (Клочко Олександр Олександрович)** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Integrated Technologies of Mechanical Engineering named after M.F. Semko, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; Tel.: +38-096-635-93-72, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2841-9455

ПЕРМЯКОВ Є. О., ФІНОГЕНОВ О. М.

**СУЧАСНИЙ СТАН КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ГОЛОВНИХ ПРИВОДІВ ОЧИСНИХ КОМБАЙНІВ З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНО-ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ ЗМАЩУВАННЯ**

Підвищення ефективності циліндричних зубчастих передач головних приводів очисних комбайнів шляхом застосування високошвидкісних зубчастих передач з демпфівальними властивостями забезпечують підвищення довговічності, зниження вібрації, шумових характеристик, підвищення навантажувальних здібностей і зниження зносу зубів. На базі глибокого аналізу існуючої теорії гідродинаміки і конструктивних особливостей експлуатації циліндричних зубчастих передач головних приводів очисних комбайнів, шляхом забезпечення демпфуючих властивостей циліндричних зубчастих коліс приводів передніх бабок за рахунок забезпечення параметрів шорсткості поверхневого шару гідродинамічних кишень важконавантажених зубчастих коліс, розроблені наукові напрямки конструктивного забезпечення підвищення надійності, зносостійкості, плавності зачеплення зубчастих передач при утворенні неньютонівського стану робочої рідини.

**Ключові слова:** зубчасті передачі, головні привода, очисні комбайни, демпфуючі властивості, підвищення довговічності, зниження вібрації, шумових характеристик, підвищення навантажувальних здібностей, зниження зносу зубів, теорія гідродинаміки і поверхневий шар, гідродинамічні кишені, неньютонівський стан робочої рідини.

PERMYAKOV E., FINOHENOV O.

**CURRENT STATE OF CONTACTING SURFACES OF GEAR WHEELS OF MAIN DRIVES OF CLEANING COMBINES TAKING INTO ACCOUNT THE CONTACT-HYDRODYNAMIC THEORY OF LUBRICATION**

Increasing the efficiency of cylindrical gears of the main drives of cleaning combines by using high-speed gears with damping properties provides increased durability, reduced vibration, noise characteristics, increased load-bearing capacity and reduced tooth wear. Based on a deep analysis of the existing theory of hydrodynamics and design features of the operation of cylindrical gears of the main drives of cleaning combines, by ensuring the damping properties of cylindrical gears of the headstock drives by ensuring the roughness parameters of the surface layer of the hydrodynamic pockets of heavily loaded gears, scientific directions for the design of increasing the reliability, wear resistance, and smoothness of gear engagement when a non-Newtonian state of the working fluid is formed have been developed.

**Keywords:** gears, main drives, cleaning combines, damping properties, increased durability, reduced vibration, noise characteristics, increased load capacity, reduced tooth wear, theory of hydrodynamics and surface layer, hydrodynamic pockets, non-Newtonian state of the working fluid.

**Вступ.** Найважливішою проблемою машинобудування на сучасному етапі є підвищення якості продукції, що випускається, в тому числі крупномодульних циліндричних передач прокатних станів, очисних комбайнів. Експлуатаційні характеристики яких (межа витривалості, зносостійкість, коефіцієнт тертя, контактна жорсткість, міцність, довговічність, вібраційні навантаження, шумові ефекти) характеризуються станом поверхневого шару зубчастих коліс, що визначаються технологією їх виготовлення. Одним з важливих напрямків застосування гідродинамічної теорії мастила є практичне використання розробок для головних приводів очисних комбайнів, що працюють на швидкостях ( $v = 1-5$  м/с) і високих навантаженнях.

Дослідження у напрямку підвищення продуктивності зубообробки, водночас забезпечуючи задані параметри мікрогеометрії поверхні, які є критично важливими для експлуатаційних характеристик крупномодульних зубчастих коліс. Одним з важливих напрямків застосування гідродинамічної теорії мастила є практичне використання розробок для головних приводів очисних комбайнів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Під час розрахунків основних деталей та вузлів комбайну на міцність та витривалість було необхідно прийняти до уваги, що вугледобувна техніка працює в особливо тяжких умовах. Це підвищені температури, широкий спектр ударних навантажень та вкрай висока запиленість. При цьому потрібно забезпечити високу довговічність зубчастих передач та підшипників – не менше 15000 год. При вирішенні контактної-гідродинамічної задачі для різних циліндричних зубчастих передач очисних комбайнів, які забезпечують надійність процесів обробки, розглянуті контактні взаємодії і зміщення циліндричних зубчастих коліс під дією сил тиску, що виникають і змащувальному шарі.

Одним з важливих напрямків застосування гідродинамічної теорії мастила є практичне використання розробок для головних приводів очисних комбайнів, що працюють на високих швидкостях ( $v = 3-5$  м/с) і високих навантаженнях.

Очисний комбайн УКД200-500 (рис.1) є універсальною машиною яка може працювати у складі множини очисних комплексів. На рис. 2 показаний очисний комплекс 09МДН у складі кріпи 09ДТ, комбайну УКД200-500, конвеєра СП251.

Під час розрахунків основних деталей та вузлів комбайну на міцність та витривалість було необхідно прийняти до уваги, що вугледобувна техніка працює в особливо тяжких умовах. Це підвищені температури, широкий спектр ударних навантажень та вкрай висока запиленість. При цьому потрібно забезпечити високу довговічність зубчастих передач та підшипників – не менше 15000 год.



Рис. 1 – Очисний комбайн УКД200-500

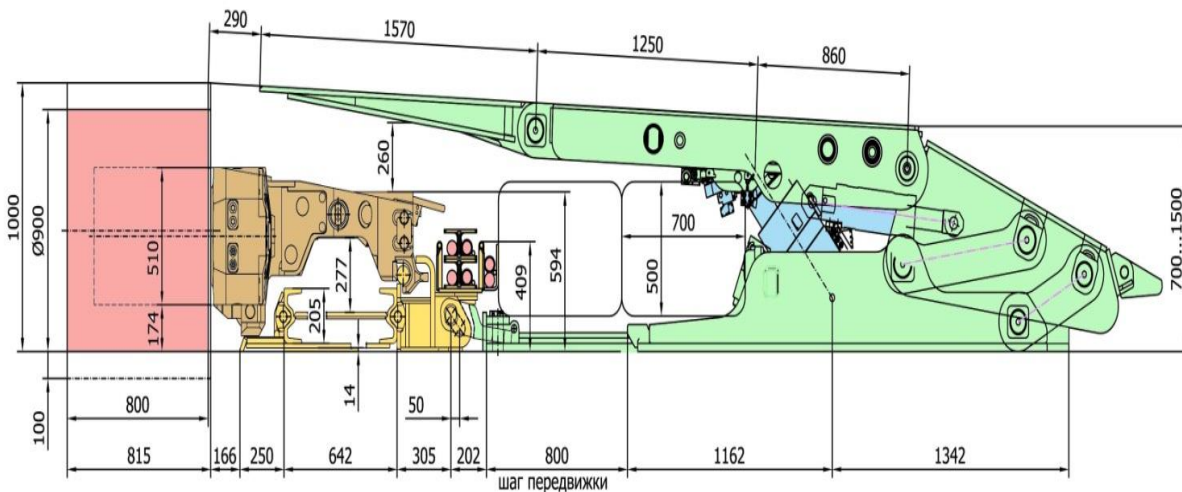


Рис. 2 – Ув'язування комбайна УКД200-500 з кріплею 09ДТ та конвеєром СП251

Основні технічні та експлуатаційні особливості комбайна УКД200-500:

- підвищення енергоозброєності приводу різання до 500 кВт;
- повна уніфікація редукторів різання (без лівого/правого виконання);
- можливість демонтажу електродвигунів без розстикування комбайна;
- полегшено складання/розбирання основних вузлів комбайна;
- забезпечена вписуваність комбайна при потужності пласта 0,85 м на пластах з неспокійною гіпсометрією;
- застосування комбайна на вугіллі з опірністю різання до 480 кН/м;
- можливість відпрацювання лав довжиною до 300 м;

Основні конструктивні особливості комбайна УКД200-500:

- розташування корпусу комбайна в уступі вибої шахти;
- адаптована до верхняків кріплення конструкція порталу;
- розрахункова довговічність 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;
- оснащення шнеків системою пилоподавлення із захистом від фрикційного іскріння.

- гідросистема з водяним охолодженням та можливістю встановлення різних типів насосів за бажанням замовника.

При вирішенні контактної-гідродинамічної задачі для різних циліндричних зубчастих передач очисних комбайнів, які забезпечують надійність процесів обробки, розглянуті контактні взаємодії і зміщення циліндричних зубчастих коліс під дією сил тиску, що виникають і змащувальному шарі.

Фахівці в галузі граничного тертя стверджували, що рідинне тертя можливо лише при товщині мастильного шару, що перевищує 0,05–0,1 мкм, проте в результаті нового дослідження в'язкості рідин в тонких шарах прийшли до висновку [1, 8], що в більшості випадків об'ємна в'язкість рідини зберігається до товщини шару порядку 200 Å (0,02 мкм). У нижчих шарах в'язкість і залежно від хімічної природи рідини може мати значення більше або менше об'ємної. Нарешті, в шарі менше 20–30 Å в'язкість, як правило, має аномально низьке значення (10% від об'ємної). У деяких випадках значення об'ємної в'язкості зберігалось аж до 20–30 Å (0,002–0,003 мкм).

У дискусії з обговорення проблем використання методів реології в області мастила А. Дайсон [2, 6, 8, 9] повідомив про свої експериментальні результати, які доводять можливість застосування гідродинаміки для мастильних шарів аж до 150 Å (0,015 мкм).

У роботі А. Камерон, В. Уїнер (США) і Ф. Вестлейк (Англія) показали, що при товщині мастильного шару до 0,015–0,02 мкм змащування можна вважати чисто контактної-гідродинамічним. Разом з тим раніше А. Камерон також вважав, що граничне тертя може мати місце при товщині мастильного шару близько 0,1 мкм. Д. Тейбор на тій же конференції стверджував, що для хімічно активних мастил граничне тертя матиме місце при товщині плівки менше 0,005 мкм. Зрозуміло, ці висновки отримані тільки при дуже високій шорсткості контактуючих поверхонь.

Таким чином, можна вважати достатньо доведеною можливість застосування контактної гідродинаміки для високошвидкісних зубчастих передач, і в даний час необхідні вже не нові докази наявності мастильного шару, а розробка загальної теорії та методів розрахунку, придатних для аналізу роботи деталей при великих і малих швидкостях руху, навантажень і радіусів кривизни поверхонь, що труться.

Першу спробу застосувати гідродинамічну теорію змащування для розрахунку циліндричних поверхонь з великою різницею радіусів зробив Г.М. Мартін. Пізніше цим же завданням займався А.М. Ертель, [1, 2, 35], Пеплер та ін.. Їх роботи були засновані на так званій класичній гідродинамічній теорії змащування. У них передбачалося, що: поверхні тертя не деформуються (абсолютно жорсткі); в'язкість масла є постійною у всій області тертя.

В результаті застосування цих досліджень для аналізу роботи передач були отримані настільки малі товщини змащувального шару, що виникли навіть сумніви в можливості існування рідинного тертя. Прагнучи наблизити теорію і розрахунок до практики експлуатації відповідних деталей, А. Камерон, Е. Івен і Е. Гаткомб почали враховувати залежність в'язкості масла від тиску, але не враховували деформації поверхонь і їх стан параметрів шорсткості. Вперше була застосована класична гідродинамічну теорію змащування до розрахунку поверхонь з подвійною кривизною (кочення кульки по біговій доріжці), при цьому він врахував вплив залежності в'язкості масла від тиску. Дослідження, проведені А.М. Ертелем [2, 5, 6, 7] показали, що при наявності залежності в'язкості масла від тиску в області тертя виникають великий місцевий тиск, який викликає значні деформації поверхней, що труться. Очевидно, що без урахування цих деформацій неможливо розробити теорію, близьку до дійсності.

Першу спробу отримати елементарне рішення задачі гідродинамічної теорії мастила при наявності деформації поверхонь тертя зробив А.М. Ертель. Була розроблена

сучасна контактної-гідродинамічна теорія мастила [1, 2, 8, 9], в якій врахували деформації поверхонь, залежність в'язкості масла від тиску і температури, а також стисливість масла.

Незважаючи на те, що це були перші роботи з контактної-гідродинамічної теорії мастила і з моменту їх опублікування з'явилася значна кількість нових досліджень, вони до сих пір відрізняються широтою охоплення і глибиною проникнення в сутність проблеми. Тому Петрусевича, Ертеля і Грубіна називають творцями контактної-гідродинамічної теорії мастила.

В оглядових роботах [2, 5, 4, 7], міститься ґрунтовний аналіз розвитку гідродинамічної теорії мастила і контактної-гідролічної проблеми.

У дослідженнях А. Камерона, Е. Мак-Івена, Ф. Остерло враховувалася залежність в'язкості масла від тиску, але не враховувалася деформація поверхні тертя; в роботі А. Мілна та І. Кола [2, 5, 7, 8] рішення отримано елементарними засобами без урахування залежності в'язкості масла від тиску в коробках швидкостей зубчастих механізмів (рис. 3)

Ф. Остерло і Е. Сайбел вирішили контактної-гідродинамічні завдання для плаского повзуна шляхом введення поправок в теорію, яка передбачає його абсолютну жорсткість. Вони не врахували залежність в'язкості масла від тиску і знайшли, що поправка, що отримується при обліку деформації поверхні, для місцевого тиску менше 17%, а для вантажопідйомності – менш 6 %. Рішення Г. Вебера і К. Саальфельда [3, 7, ] отримані чисельним методом шляхом послідовного накладення одне на одне рішень гідродинамічного і пружного завдань по черзі до отримання збіжності результату. При цьому в роботі І. Дьорра приймалося, що в'язкість не залежить від тиску, а в роботах Порицького, Вебера і Саальфельда отримано рішення з урахуванням

залежності в'язкості масла від тиску. Всі зазначені автори в якості вихідного наближення брали профіль зазору або епюру розподілу тиску, що відповідали недеформованому поверхонь. У зв'язку з цим застосований метод послідовних наближення привів до збіжності результатів тільки для малих деформацій. Таким чином, найбільш цікаві для практики випадки залишилися не розглянутими. При цьому облік деформації поверхні і залежності в'язкості масла від тиску приводив до відносно невеликого підвищення вантажопідйомності: наприклад, у Г. Вебера і К. Саальфельда – не більше ніж в 2,7 рази, в інших роботах ще менше, в той час, як дійсне збільшення може бути в 100 і 200 разів. За вихідну епюру була прийнята епюру тиску Герца. Рішення проводилося чисельним шляхом, причому в розмірній формі для окремих ділянок на вході і виході області тертя.

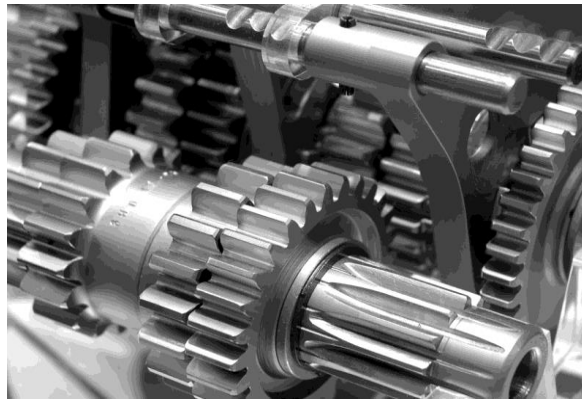


Рис. 3 – Коробка швидкостей з зубчастими високошвидкісними колесами

Особливе місце займають роботи Д. Даусона і Г. Хіггінсона. У своїй першій роботі [1, 5] вони знайшли чисельне рішення для чотирьох окремих випадків при трьох незалежних безрозмірних параметрах і великому наведеному радіусі кривизни. Однак там ще не було ніяких узагальнень або розрахункових формул. Пізніше одночасно з вченими [6] знайшли рішення для ряду додаткових окремих випадків і на основі статистичної обробки 17 розрахункових випадків отримали свої формули для найменшої товщини мастильного шару [6]. Слід зауважити, що до сих пір Д. Даусон і Г. Хіггінсон в своїх публікаціях не привели форми зазорів і епюри тиску для різних значень розрахункових параметрів за винятком декількох окремих випадків. У зв'язку з тим, що їх рішення містить три незалежних безрозмірних параметра, очевидно, що неможливо, користуючись цими чотирма випадками, визначити форму зазору між поверхнями і товщину мастильного шару на основній частині площадки контакту для будь-якого поєднання робочих параметрів.

Д. Даусон уточнив свою розрахункову формулу для визначення  $h_m$ , після чого його результати стали відрізнятися від результатів робіт, не більше ніж на 20%.

Д. Даусон і Г. Хіггінсон в роботі [3, 5] вказали, що експериментально вдалося підтвердити існування піку тиску на вихідній частині епюри тиску, однак ширина піку мала (мала додаткова площа епюри тиску під цим піком), тому вона практично не робить ніякого впливу на зв'язок між вантажопідйомністю та товщиною мастильного шару. Вони ж стверджували, що цей пік слабо впливає і на величину напружень в контактують поверхнях, т. Е. На довговічність. Слід зазначити, що в попередніх рішеннях контактної-гідродинамічної завдання розглядалося випадок лінійного контакту.

Рішення для точкового контакту отримали І. Арчерд і Е. Ковкінга [2], Г. Чжен [5]. Всі згадані теоретичні роботи розглядали ізотермічну стаціонарне контактної-гідродинамічне завдання для рідин, що знаходяться в ньютонівському стані.

**Мета дослідження.** Мета роботи полягає в розробці конструктивних рішень підвищення зносостійкості, міцності, довговічності зубчастих передач на основі сучасного стану контактуючих поверхонь зубчастих коліс головних приводів очисних комбайнів з урахуванням контактної-гідродинамічної теорії змащування.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

Проаналізувати основні параметри підвищення точності зубчастих коліс важких токарних верстатів.

Дослідити умови при яких забезпечується контактної-гідродинамічне завдання для рідин, що знаходяться в ньютонівському стані..

У контактної-гідродинамічної теорії не враховувалося ньютонівської поведінки рідини і стан поверхневого шару зубчастих циліндричних передач головних приводів металорізальних верстатів. Ньютонівською називають рідину, у якій дотичне напруження зсуву  $\tau$  прямо пропорційно градієнту швидкості деформації  $\frac{\delta u}{\delta y}$ , і коефіцієнт пропорційності, званий в'язкістю  $\mu$ , є функцією тиску  $k_0$  і температури  $T$ , але не залежить ні від швидкості руху, ні від градієнта швидкості руху масла:  $\tau = \mu(k_0, T) \frac{\delta u}{\delta y}$ .

Неньютонівською називають рідину, у якій залежність дотичного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву складніша. У цьому випадку доцільно за аналогією з ньютонівською рідиною висловлювати дотичне напруження у вигляді  $\tau = \mu_{\text{эф}} \left( k_0, T, u, \frac{\delta u}{\delta y} \right) \frac{\delta u}{\delta y}$ , де коефіцієнт пропорційності  $\mu_{\text{эф}}$  вже залежить від швидкості і градієнта швидкості. Не можна говорити про неньютоновські рідини без згадки про релаксації – процесі повернення системи в стан термодинамічної рівноваги після виведення його з цього стану. Час релаксації має істотне значення для неньютоновських рідин. Як відомо, цей час, протягом якого ухилення будь-якого параметра системи від його рівноважного значення зменшується в  $e$  раз [2, 8]. Фактично час релаксації визначається часом, необхідним для переміщення частинки рідини на відстань близько середньої відстані між сусідніми молекулами. У зв'язку з цим час релаксації істотно залежить від температури і тиску рідини: з ростом тиску і зменшенням температури час релаксації експоненціально зростає.

Якщо частка рідини піддається тиску або нагріванню протягом часу значно більшого, ніж час релаксації, рідина повністю релаксує і набуває, наприклад, в'язкість, відповідну цьому тиску і температурі (певної при статичних випробуваннях). Якщо ж час впливу обурення менше часу релаксації або має приблизно той же порядок, в'язкість не встигає досягти свого рівноважного стану, і пружно-в'язка рідина набуває ефективну в'язкість, істотно відрізняється від статичної (іноді навіть в десятки і сотні разів [7]).

При роботі зубчастих передач, як уже раніше зазначалося, частинки масла зазвичай за мільйонні частки секунди проходять через зону контакту, тобто, за цей час тиск спочатку зростає від атмосферного до десятків тисяч кілограм-сили на сантиметр квадратний, а потім убуває до атмосферного. У зв'язку з тим, що час релаксації для різних рідин при різних тисках і температурах може мати порядок від  $10^{-8}$  до  $10^{-4}$  с, в ряді випадків масло може знаходитися в неньютонівському стані.

**Основна частина.** Таким чином очевидно, що поділ рідин на ньютонівські і неньютонівські є умовним. Строго кажучи, це так само помилково, як і розподіл металів на тендітні і пластичні. Залежно від умов досвіду рідина може перебувати в ньютонівському і неньютонівському стані, як і метал в крихкому і пластичному стані. Більш того, всередині зони контакту двох поверхонь є ділянки, де рідина знаходиться в ньютонівському стані, і ділянки, де вона знаходиться в неньютонівському стані.

Неньютонівський ефект в'язко-пружної рідини вперше врахував А. Мілн в роботі [1, 3, 8], де він вирішував гідродинамічне завдання для максвеллівської рідини при заданій формі зазору, що не деформується. В результаті було отримано, що несуча здатність такої рідини значно менше, ніж ньютонівської.

Спробу вирішити контакт-гідродинамічні завдання для Рі-Ейрінгівської неньютонівської рідини зробив І. Белл в роботі [2], а також І. Белл, І. Кеннел і Ц. Аллен в роботі [9]. У цих роботах отримано рівняння Рейнольдса для Рі-Ейрінгівської рідини і далі методом Ертеля-Грубіна вводиться поправка для обліку контактних деформацій. Тут і в наступних роботах тих же авторів показано, що значна розбіжність між їх експериментальними і раніше відомими теоретичними результатами для двох масел полі-феніловий ефіру і моторного масла SAE-50 можна пояснити при обліку неньютонівських властивостей цих масел. Зокрема, якщо рівняння цих досвідчених даних з теоретичними (отриманими для ньютонівських рідин) призводить до розбіжності близько 100% і більше, то при порівнянні з теоретичними для Рі-Ейрінгівської рідини розбіжність вже менш 46 %.

З'явилися роботи, присвячені неньютонівській поведінці мастил. У роботі І. Аппелкорна [2, 5] сказано, що більшість моторних масел містить значні добавки полімерів, і такі масла слід розглядати як неньютонівські, так як їх в'язкість зменшується при високих швидкостях зсуву, що призводить до різкого зменшення несучої здатності. При високих швидкостях зсуву, коли пружні ефекти мають істотне значення, в'язкість цих масел наближається до в'язкості основного компонента.

Ці дані розкривають механізм впливу функціонального навантаження на мікроциркуляцію, а отже, і трофіку кісток і хряща, необхідних для збереження їх структурної організації. В цьому і полягає біологічне значення пружних деформацій в життєдіяльності кісткової та хрящової тканин.

Результати досліджень динаміки зміни структурної організації кістки і внутрішньокісткового кровообігу при різних умовах навантаження і функціонального перевантаження підтверджують дані літератури про тісні залежності процесу перебудови кісткової тканини від стану регіонарного кровообігу (табл. 1).




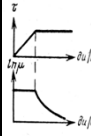

З урахуванням отриманих даних про гідродинамічні ефекти пружних деформацій в кістках дозволили пояснити роль механічного фактора в механізмі фізіологічної перебудови, що лежить в основі зміни структурної організації кісток в нормі та патології. При функціональному навантаженні в кістках виникають пружні деформації, що викликають гідродинамічний ефект, сприяє нормальній внутрішньокісткової мікроциркуляції. Ступінь цього впливу залежить від кількості і величини пружних деформацій.

У літературі описаний всього один факт, який, здавалося б, суперечить наведеній точці зору. Йдеться про експерименти В. Борзофа 1959 рік, коли з ростом частоти обертання зубчастої передачі спочатку зменшувалася несуча здатність, а потім збільшувалася. Саме це збільшення, нібито, суперечить уявленням про в'язкопружної рідини.

Очевидно, що гіпотеза про ньютонівську поведінку є більш загальною точкою зору, ніж всі попередні і, мабуть, доцільно будувати рішення контакт-гідродинамічного завдання не тільки для ньютонівської рідини з

в'язкістю, що залежить від тиску по Барусу, але і для неньютонівських рідин. Розглянемо деякі інші аспекти контактної-гідродинамічної теорії мастила.

Таблиця 1 – Залежність в'язкості і дотичного напруження від тиску і градієнта швидкості для зубчастих передач

№ з/п	Схема	Автор	Причина зламу або вигину кривої	Примітка
1		Барус	—	—
2		Герсі Гопкінс	«Затвердіння» мастила при високому тиску	Обмежена в'язкість, але не обмежене дотичне напруження з ростом градієнта швидкості
3		Аллен, Таунсенд	—	—
4		Джонсон і Камерон Хью і Камерон	Результати досвіду, іноді пов'язані з не неньютонівськими властивостями масел	Отримано або при статичних випробуваннях в віскозиметрах, або в роликовому контакті
5		Джонсон і Камерон Хью і Камерон]	Існування «верхнього граничного напруження зсуву» або зрізу мастила	Обмежено дотичне напруження, але не обмежена в'язкість
6		Рі-Ейрінг, Белл	Неньютонівська поведінка рідини	Експериментально отримано при дослідженні реологічних характеристик масел

### Висновки.

Визначен аналіз сучасного стану контактної-гідродинамічної теорії мастила і можливості її застосування. Наведено рішення задачі теорії пружності для пружного шару на жорсткій основі. Дане математичне формулювання контактної-гідродинамічного завдання.

Визначено математичні формулювання контактної-гідродинамічного завдання при різних технологічних способах формоутворення сполучених евольвентних поверхонь зубчастих коліс головних приводів очисних комбайнів

### Список літератури

1. Клочко А.А. Гидродинамические процессы смазки цилиндрических зубчатых передач с неньютоновским состоянием жидкости / А.А. Клочко, Т.В. Терещенко // Всеукраїнська наукова конференція «Розвиток прикладної науки, освіти та студентського самоврядування на Буковині» (26-27 травня 2017 р., м. Чернівці) : матеріали конф. - Харків: НТУ «ХП», 2017. –С. 40–42. – ISBN 978-617-05-0241.
2. Клочко А.А. Обеспечение трибологических параметров зубчатых передач / А.А. Клочко, П.И. Фирман, Д.А. Кравченко // Всеукраїнська наукова конференція «Розвиток прикладної науки, освіти та студентського самоврядування на Буковині» (26-27 травня 2017 р., м. Чернівці) : матеріали конф. - Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 42–44. – ISBN 978-617-05-0241..
3. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
4. Циліндричні зубчасті передачі з неньютонівським станом робочої рідини / В.Д. Ковальов, О.). Клочко, Д.О. Кравченко, М.І. Гасанов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали п'ятнадцятої Міжнар. наук.-техн. конф., 30 травня – 1 червня 2017 р. / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 40.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Клочко О.О., Старченко О.П., Пермяков Є.А., Кобельник В.Р. Контактна гідродинамічний ефект переходу рідини з ньютонівського стану в неньютонівський при зачепленні вискохідних коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 103– 104. – ISBN 978-617-7889-20-4.

7. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
8. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Ключко О.О., Старченко О.П., Пермяков Є.А., Кобельник В.Р. Контактно гідродинамічний ефект переходу рідини з ньютонівського стану в неньютонівський при зачепленні вискохідних коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 103– 104. – ISBN 978-617-7889-20-4.
9. Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Ключко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укд200-500 нового покоління // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

#### References (transliterated):

1. Klochko A.A. Hydrodynamicheskiye protsessy smazky tsylindricheskykh zubchatykh peredach s neniutonovskym sostoyaniem zhydkosti / A.A. Klochko, T.V. Tereshchenko // Vseukrainska naukova konferentsiia «Rozvytok prykladnoi nauky, osvity ta studentskoho samovriaduvannia na Bukovyni» (26-27 travnia 2017 r., m. Chernivtsi) : materialy konf. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. –S. 40–42. – ISBN 978-617-05-0241.
2. Klochko A.A. Obespechenye trybolohycheskykh parametrov zubchatykh peredach / A.A. Klochko, P.Y. Fyрман, D.A. Kravchenko // Vseukrainska naukova konferentsiia «Rozvytok prykladnoi nauky, osvity ta studentskoho samovriaduvannia na Bukovyni» (26-27 travnia 2017 r., m. Chernivtsi) : materialy konf. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. –S. 42–44. – ISBN 978-617-05-0241..
3. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
4. Tsylyndrychni zubchasti peredachi z neniutonivskym stanom robochoi ridyny / V.D. Kovalov, O.). Klochko, D.O. Kravchenko, M.I. Hasanov // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku: materialy piatnadsiatoi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 30 travnia – 1 chervnia 2017 r. / Pid zah. red. V. D. Kovalova. – Kramatorsk : DDMA, 2017. – S. 40.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Kovalov V.D., Vasylichenko Ya.V., Klochko O.O., Starchenko O.P., Permiakov Ye.A., Kobelnyk V.R. Kontaktно гидродинамичний ефект переходу рідини з ньютонівського стану в неньютонівський при зачепленні вискохідних коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 103– 104. – ISBN 978-617-7889-20-4.
7. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
8. Kovalov V.D., Vasylichenko Ya.V., Klochko O.O., Starchenko O.P., Permiakov Ye.A., Kobelnyk V.R. Kontaktно гидродинамичний ефект переходу рідини з ньютонівського стану в неньютонівський при зачепленні вискохідних коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 103– 104. – ISBN 978-617-7889-20-4.
9. Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. Systemy parametrov stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrichnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu ukd200-500 novoho pokolinnia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

Надійшла (received) 10.02.2026

#### Відомості про авторів / About the Authors

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

**Фіногенов Олексій Михайлович (Finohenov Olexsii)** – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: [+38-066-821-60-21](tel:+380668216021); е-mail: [alexey.finohenov@gmail.com](mailto:alexey.finohenov@gmail.com), ORCID: 0009-0008-6707-8511

**ЗМІСТ**

<i>Дергоусов В. М., Пермяков О. А., Устиненко О. В.</i> Щодо забезпечення ресурсу та зменшення шуму редукторів різання очисних вугільних комбайнів.....	3
<i>Кондратюк О. Л., Скоркін А. О., Скоркіна В. О., Горбулик В. І.</i> Підвищення експлуатаційних характеристик твердосплавного інструменту при високошвидкісному точінні.....	11
<i>Матюшенко М. В., Руднєв О. В., Гасанов М. І., Клочко О. О.</i> Математичне моделювання геометрії поверхні шліфуваних з використанням твердих змащувальних речовин важкооброблюваних матеріалів.....	20
<i>Місан Б. С., Нікітін Д. О.</i> Використання технології 3d-друку для виготовлення та тестування амортизувального вкладиша для ножних протезів.....	28
<i>Новіков Ф. В.</i> Теоретичне обґрунтування умов забезпечення високоточної механічної обробки.....	37
<i>Воропась М. В., Набока О. В.</i> Комплексний підхід до сучасних засобів вимірювання у машинобудуванні.....	49
<i>Мироненко С. О.</i> Дослідження коефіцієнтів форми зубів невольвентних зубчастих передач.....	55
<i>Скідін І. Е., Сайтгарєєв Л. Н., Чубенко В. А., Євтушенко С. Д., Мішин М. М.</i> Аналіз оптимальних параметрів термочасової обробки алюмінієвих розплавів.....	65
<i>Мезенцева І. О., Кузьменко О. О., Вамболь С. О., Мезенцев С. М.</i> Запобігання виробничому травматизму на підприємствах машинобудівної галузі з урахуванням особливостей умов праці .....	70
<i>Летюк В. І., Клочко О. О., Шелковий О. М., Федоренко В. С.</i> Аналіз проблеми формування групової технології обробки різанням деталей типу «робоча лопатка» парової турбіни.....	81
<i>Kovalevskyy S., Klochko O.</i> Emergence in Manufacturing Digital Twins.....	89
<i>Пермяков Є. О., Фіногенов О. М.</i> Сучасний стан контактуючих поверхонь зубчастих коліс головних приводів очисних комбайнів з урахуванням контактної-гідродинамічної теорії змащування.....	96

TABLE OF CONTENTS

*Dergouzov V., Permyakov O., Ustynenko O.* On providing resource and reducing the noise of drives of cleaning coal harvesters.....3

*Kondratyuk O., Skorkin A., Skorkina V., Gorbulyk V.* Improving the performance characteristics of a carbide tool in high-speed turning.....11

*Matiushenko M., Rudnev A., Gasanov M., Klochko O.* Mathematical modeling of the surface geometry of heavy-cut materials grinding using solid lubricants.....20

*Misan B., Nikitin D.* Use of 3d printing technology for the manufacture and testing of shock-absorbing inserts for leg prostheses.....28

*Novikov F.* Theoretical substitution of the conditions for providing high-precision mechanical processing.....37

*Voropaiev M., Naboka O.* A comprehensive approach to modern measurement tools in mechanical engineering.....49

*Mironenko S.* Research of tooth shape coefficients of non-evolvent gears.....55

*Skidin I., Saitgareyev L., Chubenko V., Evtushenko S., Mishyn M.* Optimal parameters of heat and time treatment of aluminum melts .....65

*Mezentseva I., Kuzmenko O., Vambol S., Mezentsev S.* prevention of occupational injuries at engineering enterprises taking into account the features of working conditions.....70

*Letiuk V., Klochko O., Shelkovyi O., Fedorenko V.* analysis of the problem of forming a group technology of machining steam turbine blade-type parts.....81

*Kovalevskyy S., Klochko O.* emergence in manufacturing digital twins.....89

*Permyakov E., Finohenov O.* current state of contacting surfaces of gear wheels of main drives of cleaning combines taking into account the contact-hydrodynamic theory of lubrication.....96

**ДЛЯ НОТАТКІВ**

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В  
МАШИНОБУДУВАННІ**

*Збірник наукових праць*

**№ 1'(13) 2026**

<i>Відповідальний редактор</i>	<i>О.О. Пермяков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Зам. відповідального редактора</i>	<i>О.О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Технічний редактор:</i>	<i>В.С. Федоренко, доктор філософії, асистент НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Відповідальний секретар:</i>	<i>О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати  
Кафедра інтегровані технології машинобудування ім..М.Ф.Семка  
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: [oleksandr.klochko@khi.edu.ua](mailto:oleksandr.klochko@khi.edu.ua), [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net)

Підп. до друку 02.04.2026 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. № 18.  
Ціна договірна.

---

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №  
2480000000079553, від 16.05.2007 р.