

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ**

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

**MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE**

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

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

№ 2(12)'2025

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

№. 2(12)'2025

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

**Харків
НТУ «ХПІ», 2025**

**Kharkiv
NTU "KhPI", 2025**

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2025– № 2(12). –216 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.

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

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

Мова статей – українська, англійська.

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

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

Заступник головного редактора:

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

Відповідальний секретар:

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

Члени редколегії:

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

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

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

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

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

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

Драган Перакович PhD, професор, Університет

Загреб, Хорватія

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

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

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

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

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

Михал Балол (Балог, Міхал), доцент, доктор філософії,

Технічний університет Кошице, Словаччина

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

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

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

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

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

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

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

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

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

Editor in Chief:

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

Deputy editor:

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

Responsible secretary:

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

Members of the editorial board:

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

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

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

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

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

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

Dragan Perakovich PhD, professor, University, Zagreb, Croatia

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

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

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

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

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

Balog, Mikhal, associate professor, Doctor of Philosophy,

Košice Technical University, Slovakia

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

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

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

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

"ENERGOSTAL", Ukraine

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

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

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2025

С. А. КЛИМЕНКО, А. С. МАНОХІН, А. О. ЧУМАК, М. Ю. КОПЕЙКІНА, С. А. КЛИМЕНКО

МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ КОСОКУТНОГО РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТОМ З КРУГЛОЮ ПЛАСТИНОЮ З ПКНБ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ З УДАРОМ

У роботі виконано чисельне моделювання процесів різання загартованої сталі інструментами з різними кутами нахилу різальної кромки, оснащених пластинами з ПКНБ. За допомогою пакета DEFORM-3D досліджено напружено-деформований стан у зоні первинної та вторинної деформації під час точіння з ударом. Показано, що при застосуванні інструментів з косим кутом врізання значно зменшується ударне навантаження, середня сила різання та варіація її сигналу, що свідчить про підвищену стабільність процесу. Встановлено, що збільшення кута нахилу різальної кромки до 60° призводить до зниження нормальних складових сили різання та інтенсивності деформації. Результати моделювання підтверджено експериментально, що дозволяє рекомендувати косокутне різання як ефективний підхід до обробки загартованих сталей в умовах динамічних навантажень.

Ключові слова: косокутне різання, різальний інструмент, режими різання, загартована сталь, моделювання, напружено-деформований стан.

S. KLYMENKO, A. MANOKHIN, A. CHUMAK, M. KOREPKINA, S. KLYMENKO
MODELING OF OBLIQUE CUTTING FORCES USING A ROUND PCBN INSERT TOOL DURING INTERRUPTED TURNING OF HARDENED STEEL

This study presents a numerical simulation of the cutting process of hardened steel using tools with varying rake angles, equipped with polycrystalline cubic boron nitride (PcBN) inserts. The DEFORM-3D finite element software was used to analyze the stress-strain state in the primary and secondary deformation zones during turning under impact loading. The results demonstrate that using tools with an inclined cutting edge significantly reduces impact load, cutting force, and signal variation, indicating improved process stability. It was established that increasing the rake angle up to 60° leads to a reduction in the normal components of the cutting force and the intensity of material deformation. The simulation results are confirmed by experimental data, supporting the recommendation of oblique cutting as an effective method for machining hardened steels under dynamic loading conditions.

Keywords: oblique cutting, cutting tool, cutting conditions, hardened steel, modeling, stress-strain state

Вступ. Розвиток сучасного машинобудування багато в чому обумовлено підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик деталей машин та механізмів і, відповідно, застосуванням їх виготовлення конструкційних матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками. До таких конструкційних матеріалів відносяться загартовані сталі. Обробка цих матеріалів характеризується порівняно низькою продуктивністю різання, що з інтенсивним зносом ріжучого інструменту. Найбільшу ефективність при обробці загартованих сталей проявляють різці, оснащені полікристалічним надтвердим матеріалом на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) [1].

Для підвищення ефективності обробки заготовок із загартованих сталей запропоновані спеціальні різальні інструменти, що оснащені ПКНБ. Принципові особливості роботи цих інструментів обумовлені мінімізацією напруженого деформованого стану у зоні стружкоутворення. До вищевказаних різальних інструментів відносяться різці з нахиленою ріжучою кромкою. Напружено-деформований стан у зоні стружкоутворення визначається механічними характеристиками матеріалу заготовки та умовами різання. Зрештою, напружено-деформований стан відповідає за ефективність обробки, зокрема, за енерговитрати в процесі різання, контактне навантаження робочих поверхонь ріжучого інструменту та ККД інструменту. Модельні дослідження, особливо з використанням методу кінцевих елементів, є перспективними для аналізу явищ, що відбуваються в процесі різання. В даний час є велика кількість робіт, наприклад [2-4], що описують моделювання обробки методом кінцевих елементів. В [5] проведено чисельне моделювання жорсткого точіння сталі AISI 52100, H13, D2, 4340, досліджено вплив геометрії інструмента та твердості заготовки на силу різання. Виявлено, що найбільший вплив має подача, а також геометрія інструмента, особливо негативний кут нахилу.

У роботі [6] представлені моделі скінченних елементів для прогнозування залишкових напружень, що виникають у заготовці з нержавіючої сталі 16MnCr5, обробленій твердим точінням з постійною швидкістю різання, подачею та глибиною різання різальними інструментами PcBN, які мають кути переднього нахилу в діапазоні від 15° до -30° з кроком 5° . Результати показують, що існує певна кореляція між кутом переднього нахилу інструменту та залишковими напруженнями. Чим негативніший кут переднього нахилу, тим вищі прогнозуються стискальні напруження в заготовці.

В роботі [7] досліджено вплив змінних процесу обробки (швидкості подачі) на складові сили різання, вібрації та шорсткість обробленої поверхні під час токарної обробки загартованої сталі ХВГ (60–62 HRC) з використанням круглих пластин cBN-Si₃N₄.

Однак у цих роботах, у основаному, аналізувалися характеристики процесу ортогонального різання, а закономірності різання інструментами, які працюють за косокутною схемою вивчені меншою мірою.

Метою роботи є дослідження впливу величини кута нахилу різальної кромки на сили різання при точінні з ударом загартованої сталі.

Методика досліджень. При моделюванні використовувався багатоцільовий пакет кінцево-елементних розрахунків DEFORM-3D. Для оцінки впливу геометрії інструменту на силові параметри при ударі виникненням якого супроводжується врізання інструменту в заготовку та напруження в зоні стружкоутворення завдання вирішувалося в тривимірній постановці.

Радіус заокруглення різальної кромки $\rho = 10$ мкм, фаска зносу приймалася рівною нулю. Таке спрощення допустиме, оскільки метою моделювання є визначення напружено-деформованого стану в зоні первинних деформацій під час обробки гострозаточеним різцем. Різальний інструмент моделювався як абсолютно тверде тіло. Параметри фрагмента заготівлі: довжина $L = 1,2$ мм, ширина $b = 0,6$ мм, товщина $a = 0,2$ мм. При вирішенні механічного завдання граничні умови полягали в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки та переміщенні абсолютно жорсткого інструменту вздовж осі X заготовки з постійною швидкістю $v = 2$ мм/мс, глибина різання (в даному випадку дорівнює товщині різі) $t = 0,1$ мм. Кут нахилу різця при моделюванні косокутного різання становив λ до 60° .

Дослідження закономірностей процесу різання проводилось при точінні зразків з загартованої сталі ХВГ (50–55 HRC).

Отримані результати. Суттєві відмінності у стружкоутворенні для випадків моделюванні різання з ударом за ортогональною та косокутною схемами потребують детального аналізу напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу та характеристик динаміки врізання інструменту.

Проаналізуємо момент врізання для обох типів інструменту.

При обробці з динамічними навантаженнями важливою відмінністю ортогонального різання за ортогональною від косокутного є те, що контактна пляма на інструменті утворюється при врізанні не поступово з наростанням товщини зрізу, а миттєво.

При врізанні інструментів (рис. 1) в момент контакту та початку пластичної деформації матеріалу сила різання P_z становить: для різця з $\lambda = 0^\circ$ – 150 Н ($2,7e-5$ с контакту), для різця з $\lambda = 45^\circ$ – 55 Н ($2,65e-5$ с контакту). Для моменту повного врізання інструментів ці характеристики становить 176 Н ($7,5e-5$ с) та 137 Н ($7,84e-5$ с), а інтенсивність наростання сили різання становить $5,56e6$ Н/с та $2,01e6$ Н/с відповідно, тобто моделювання демонструє суттєво менше (до 3-х разів) значення імпульсу сили різання в момент врізання інструменту, що працює за косокутною схемою різання.

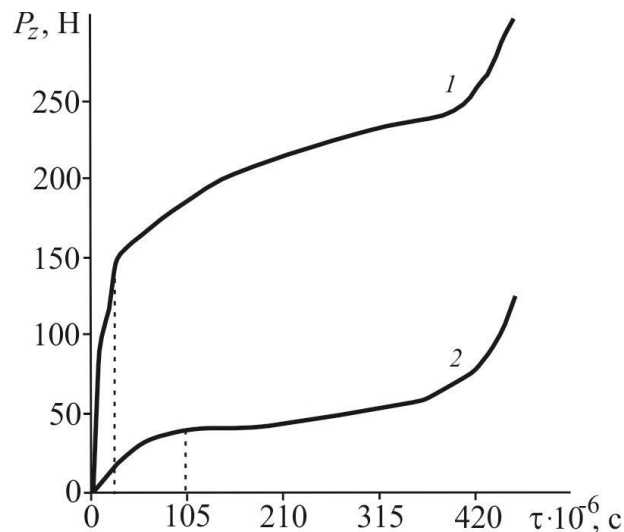


Рис. 1 – Величини тангенційної складової P_z сили різання для початкового моменту обробки: 1– $\lambda=0^\circ$; 2– $\lambda=45^\circ$

Порівняльна оцінка ефективних напружень демонструє, що для зони первинних деформацій характерним значенням цього показника є 1420–1720 МПа (ортогональне різання) та 1270–1590 МПа (косокутне різання). Величини ефективної деформації також мають суттєві відмінності і в зоні вторинних деформацій вони за рахунок тангенційної складової переміщень оброблюваного матеріалу є вищими для інструменту, що працює за косокутною схемою різця ($\epsilon = 2,50$ – $3,15$), у порівнянні з інструментом, що працює за ортогональною семою різання ($\epsilon = 2$).

При врізанні інструмента в заготовку ударний імпульс призводить до виникнення автоколивань в системі різець-динамометр. При реєстрації сигналів від динамометра відповідно спостерігається не лише складові сили різання, а й додаткові компоненти сигналу, пов'язані з пружною деформацією вимірювальної системи при її коливаннях. Приклад такої суперпозиції сигналів наведено на рис. 2.

З метою визначення частини сигналу, що відображає безпосередньо дію сили різання було проведено додаткові дослідження.

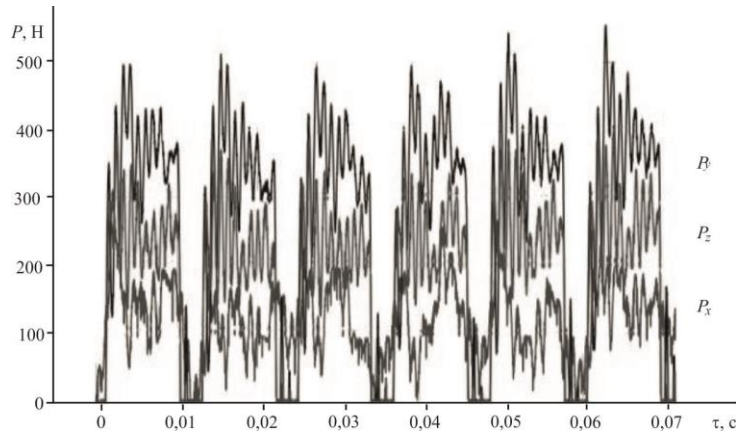


Рис. 2 – Складові сили різання при обробці з ударом ($v = 220$ м/хв, $t = 0,2$ мм, $S = 0,38$ мм/об, $h_z = 0$ мм)

Як відомо, ударом по матеріальній точці називається фізичний процес, що відбувається за досить малий час τ , в результаті якого швидкість точки змінюється на кінцеву величину та напрямком. При цьому сила $F_{уд}$, що діє на матеріальну точку за малий час удару і досягає досить великих значень, називається ударною силою. За час удару τ миттєва сила змінюється від нульового до максимального значення точки, а потім знову до нульового, тобто ця сила є змінною за часом. Графічно ударна сила представляється у вигляді імпульсного гребеня, пік якого відповідає максимальному значенню цієї сили (рис. 3, а).

Інтеграл від ударної сили $F_{уд}$ на малому проміжку часу τ (часу удару) називається ударним імпульсом і позначається як $S_{уд} = \int_0^{\tau} F_{уд}(t) dt$.

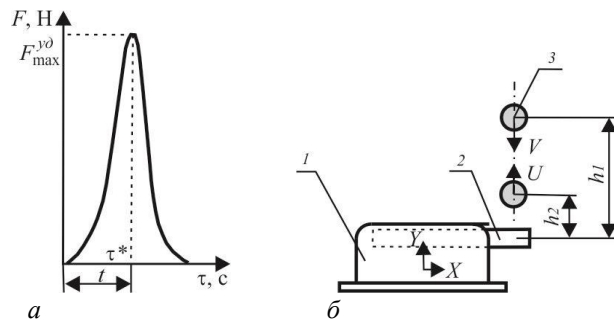


Рис. 3 – Графічне представлення дії ударної сили (а), схема імітації ударного імпульсу при врізанні інструменту (б)

Визначимо величину ударного імпульсу при імітації врізання різця. Даний ефект реалізовано при падінні на інструмент вантажу (кульки) вагою 0,05 кг з висоти 0,5 м. Схему дослідів наведено на рис. 3, б, де 1 – динамометр УДМ-600, 2 – державка різця, 3 – кулька. Розрахункове значення визначається виразом (1), де v , u та $h_1 = 0,5$ м, $h_2 = 0,14$ – швидкості в момент падіння і пружного відскоку кульки та висота її падіння і відскоку:

$$F\Delta t = \Delta p = mv = m(v + u) = m(\sqrt{2gh_1} + \sqrt{2gh_2}), \quad (1)$$

$$S_{уд} = 0,05 \left(\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} + \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,14} \right) = 0,24 \text{ Н} \cdot \text{с} \quad (2)$$

Одночасно величину $S_{уд}$ можна визначити з експериментальних даних, шляхом чисельного інтегрування залежності сили від часу, зареєстрованих при фіксації сигналу з динамометру за допомогою АЦП ADA-1406 на частоті 350 кГц. Аналіз графіка (рис. 4) дозволяє встановити, що час дії сили (першого піку на графіку) становив 0,84 мс, а максимальне значення сили удару становило 512 Н. Таким чином величина ударного імпульсу сили, визначена експериментально дорівнює $S_{уд} = 0,215$ Н·с.

Враховуючи, що різниця між експериментальним та розрахованим значенням імпульсу сили складає біля 10%, можна зробити висновок, що безпосередньо явищу удара відповідає лише перший пік на графіку залежності сили різання від часу, а інші гармоніки сигналу відображають затухаючі коливання в системі різець-динамометр після дії ударної сили.

Оскільки при різанні після врізання і удару на різець продовжує діяти сила різання, можна прийняти у якості моделі сигналу діаграму на рис. 5 [8] і в подальшому аналізувати результати вимірювань у відповідності з цією моделлю.

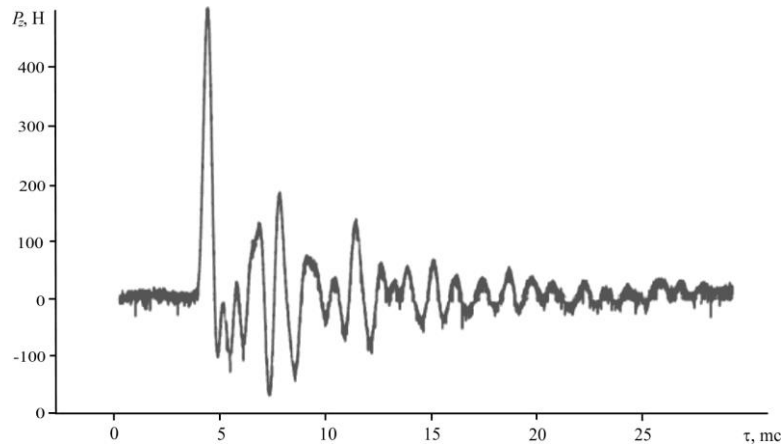


Рис. 4–Сигнал динамометру, отриманий при фіксації ударного імпульсу

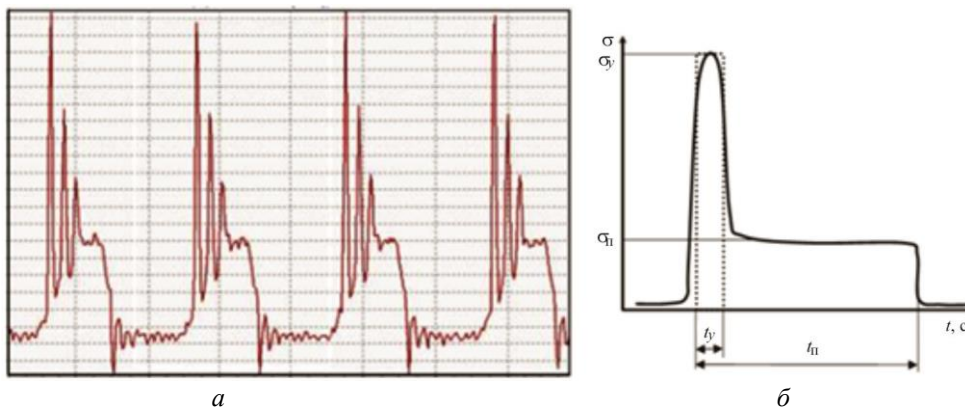


Рис. 5 –. Реальна діаграма отримана при визначенні сили різання (а) та її ідеалізоване відображення (б)

Проаналізуємо у відповідності з наведеною вище методикою сигнал складової сили різання P_z , отриманий при різанні інструментом з пластиною RNUN-120400 з ПКНБ Vorsinit за умов $\lambda = 0^\circ$, $v = 120$ м/мин, $t = 0,2$ мм, $S = 0,19$ мм/об, $h_z = 0$ мм. На рис. 6, а зображено сигнал, зафіксований при проходженні інструменту скрізь масив оброблюваного матеріалу в проміжку між двома пазами. Величина першого імпульсу на графіку становить $P_{зуд} = 400$ Н при середньому значенні сигналу і, відповідно, складової P_z на ділянці $t = 0,010-0,024$ с $P_{зср} = 248$ Н та середньоквадратичному відхиленні $\sigma_{Pz} = 70$ Н. Ударний коефіцієнт становить $K_y = 400/248 = 1,61$.

Для порівняння наведемо аналогічну діаграму для випадку обробки за косокутним різанням інструментом, оснащеним пластиною того ж типу-розміру (рис. 6, б).

Відразу ж помітно, що завдяки кінематиці врізання такого інструменту відсутній ударний імпульс, а величина складової P_z та дисперсія значень сигналу, яка характеризує стабільність процесу різання, суттєво нижча – $P_{зср} = 181$ Н при середньоквадратичному відхиленні $\sigma_{Pz} = 13$ Н. Наглядне порівняння типів сигналів сили різання при обробці досліджуваними інструментами наведено на рис. 7.

Оскільки обробка за косокутною схемою характеризується значними перевагами, розглянемо більш детально силові параметри саме такого процесу. Залежність складових сили різання від кута нахилу різальної кромки наведена на рис. 8 [1]. Слід відзначити, що зростання кута нахилу різальної кромки λ приводить до інтенсивного зниження складових P_y та P_z при зростанні складової P_x . Перші дві складові знижуються внаслідок зменшення ширини зрізу та ступеню деформації оброблюваного матеріалу в зоні первинних деформації, що є важливою перевагою косокутної схеми різання у порівнянні з ортогональною.

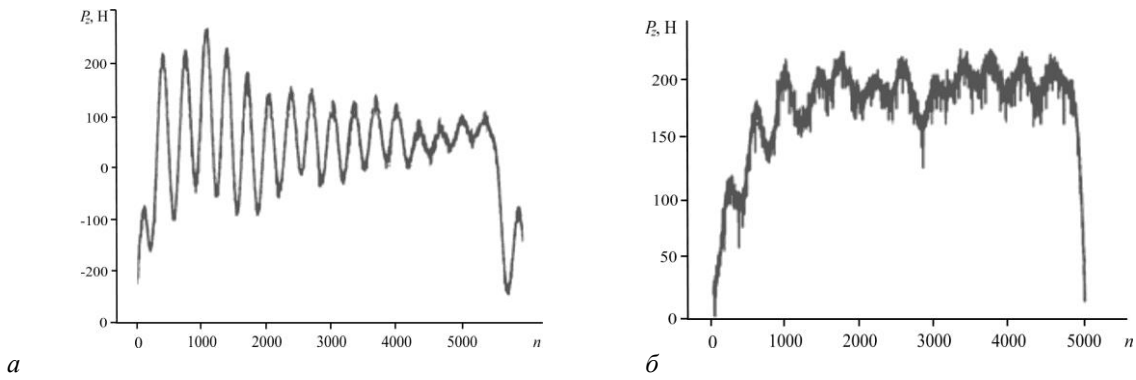


Рис. 6 –. Сигнал сили різання при обробці інструментами з $\lambda = 0^\circ$ (а) та $\lambda = 50^\circ$ (б)

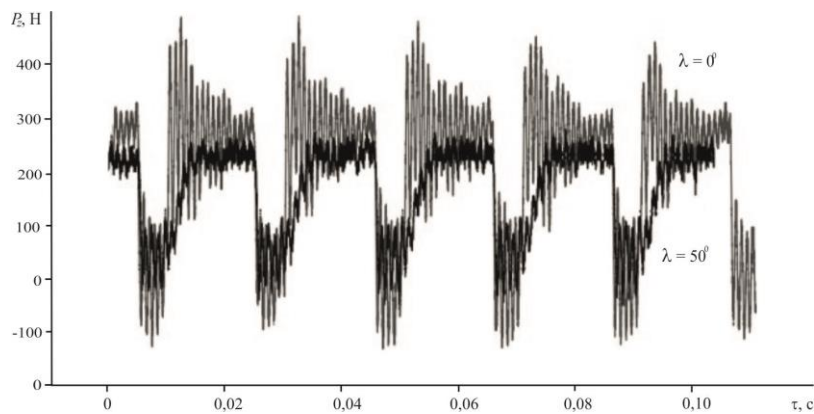


Рис. 7. – Сигнали сили різання при обробці інструментами з кутами нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$ (а) та $\lambda = 50^\circ$ (б)

Розроблена в [1] модель дозволяє оцінити вплив кута нахилу різальної кромки інструменту на ступінь пластичної деформації оброблюваного матеріалу. Зростання кута λ викликає зменшення відносного зсуву в нормальному напрямку ϵ_N , що пов'язано з відхиленням напрямку сходу стружки від нормалі до різальної кромки, зменшення нормальної складової сили тертя на передній поверхні інструменту, що призводить до збільшення кута дії ω і відповідного зростання кута зсуву в нормальній до різальної кромки площин. У міру збільшення кута λ , зростання кута тертя η призводить до більш інтенсивної деформації матеріалу при його переміщенні вздовж різальної кромки і, відповідно, до зростання дотичної складової відносного зсуву ϵ_T .

Ступінь деформації матеріалу, що визначається сумарним відносним зсувом ϵ_Σ також знижується, хоча і меншою мірою, ніж ϵ_N і усадка стружки в нормальному напрямку ζ . Розрахунок показує, що для зазначених умов зі збільшенням λ від 20° до 60° величини ϵ_N , ϵ_Σ та ζ зменшуються відповідно у 1,6, 1,4, 2,67, а ϵ_T зростає у 1,63 рази.

Діаграми складових сили різання для різних кутів нахилу різальної кромки наведено на рис. 9.

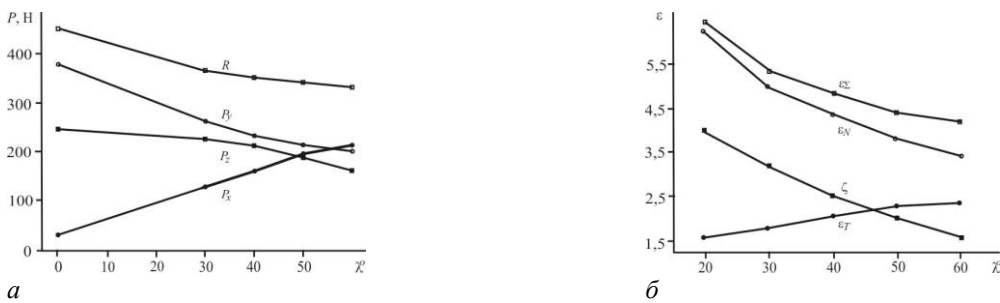


Рис. 8–Експериментальна залежність впливу кута нахилу різальної кромки λ на складові сили різання ($S = 0,19$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 120$ м/хв) (а), розрахункова залежність ступеню пластичної деформації оброблюваного матеріалу від кута нахилу різальної кромки λ (б)

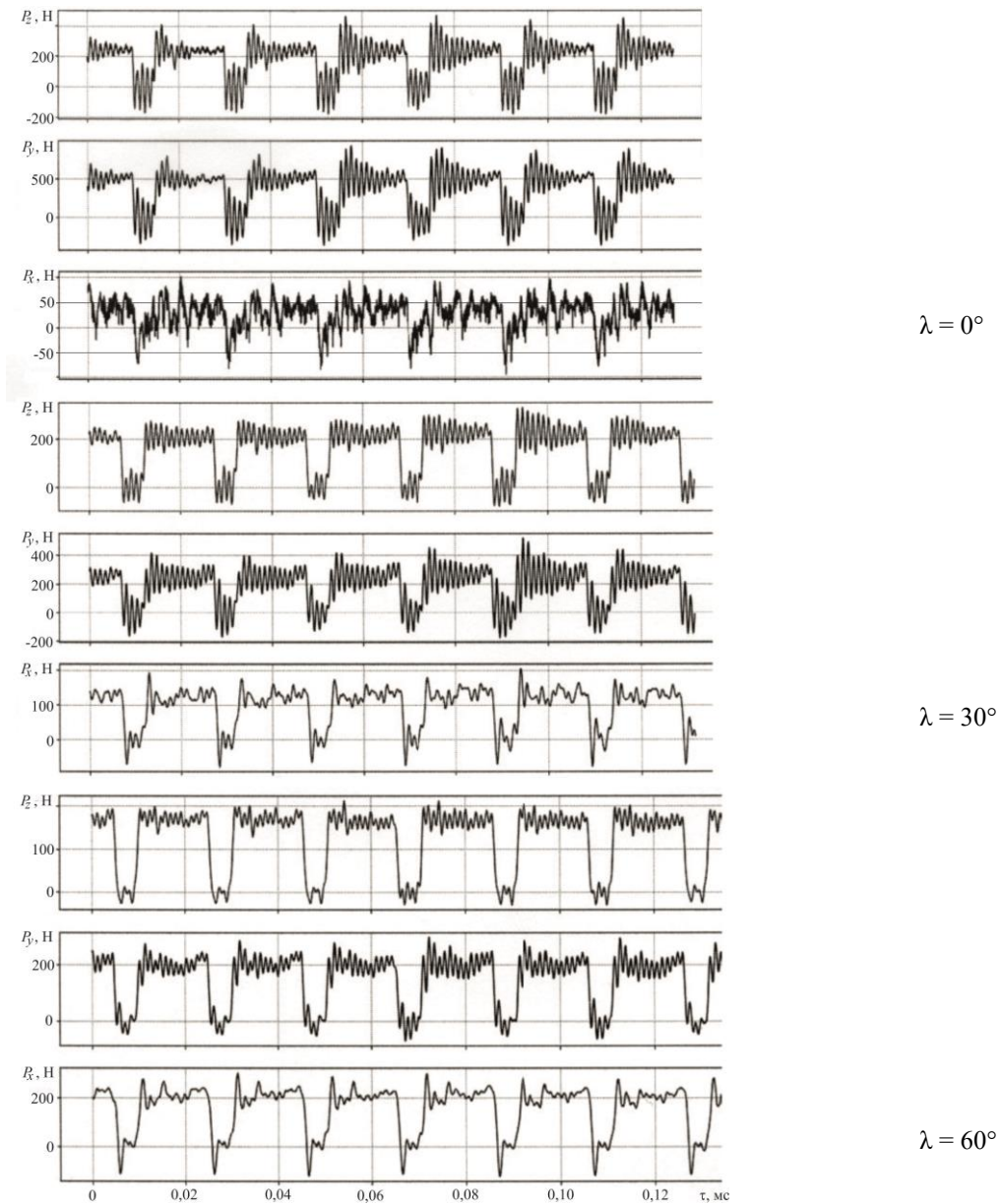


Рис. 9–Змодельовані складові сили різання для інструментів з кутами нахилу різальної кромки ($S = 0,19$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 120$ м/хв)

Результати моделювання показали, що середні значення сили, що діє на інструмент під час різання, вище величини періодичної сили, що обурює.

Збільшення кута нахилу різальної кромки різця у діапазоні до 60° при переході від ортогонального різання до косокутного призводить до зменшення складових P_z , P_y орієнтовно у 1,4 та 2,4 рази, відповідно, а також до зростання складової сили різання P_x у 7 разів. Отримані модельні результати близькі до експериментальних. Потрібно вказати, що найбільш значимо змінюється складова сили різання P_x , що обумовлено зростанням ступеню пластичної деформації оброблюваного матеріалу у зоні різання, та відповідно сили тертя у напрямку подачі при збільшенні кута нахилу різальної кромки різця.

Висновок.

З використанням багатоцільового пакету кінцево-елементних розрахунків DEFORM-3D проаналізовано процес врізання для інструментів, оснащених різальними пластинами RNUN-120400 з ПКНБ Borsinit, які працюють за ортогональною та косокутною схемами різання, при точінні загартованої сталі динамічними навантаженнями: – в момент контакту та початку пластичної деформації матеріалу сила різання P_z становить для різця з 0° – 150 Н, для різця з 5° – 55 Н; – для моменту повного врізання інструментів ці характеристики становить 176 Н та 137 Н, а інтенсивність наростання сили різання становить $5,56e6$ Н/с та $2,01e6$ Н/с відповідно. Таким чином, значення імпульсу сили різання в момент врізання інструменту, що

працює за косокутною схемою різання, суттєво менше ніж для інструменту, що працює за ортогональною схемою різання.

Для зони первинних деформацій характерні значення ефективних напружень: – для ортогонального різання 1420–1720 МПа; – для косокутного різання 1270–1590 МПа. В зоні вторинних деформацій ефективні деформації є вищими для інструменту, що працює за косокутною схемою ($\epsilon = 2,50-3,15$), у порівнянні з інструментом, що працює за ортогональною схемою різання ($\epsilon = 2$), за рахунок тангенційної складової переміщень оброблюваного матеріалу.

Встановлено, що завдяки кінематиці врізання інструменту, що працює за косокутною схемою різання, відсутній ударний імпульс, а величина складової P_z та дисперсія значень сигналу, яка характеризує стабільність процесу різання, суттєво нижча, ніж для випадку використання інструмента, що працює за ортогональною схемою різання.

Зростання кута нахилу різальної кромки у діапазоні $(0-60)^\circ$ викликає: – зменшення відносного зсуву в нормальному напрямку, що пов'язано з відхиленням напрямку сходу стружки від нормалі до різальної кромки, зменшення нормальної складової сили тертя на передній поверхні інструменту, що призводить до збільшення кута дії і відповідного зростання кута зсуву в нормальній до різальної кромки площині; – зростання кута тертя, що призводить до більш інтенсивної деформації матеріалу при його переміщенні вздовж різальної кромки і, відповідно, до зростання дотичної складової відносного зсуву; – зниження ступеню деформації матеріалу, що визначається сумарним відносним зсувом; – зменшення складових P_z , P_y у 1,4 та 2,4 рази відповідно, а також до зростання складової сили різання P_x у 7 разів.

Список літератури:

1. Манохін, А.С. Підвищення продуктивності чистового точіння загартованих сталей косокутним однокромочним інструментом з ПНТМ на основі КНБ : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Манохін. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2009. – 21 с.
2. Qian, L., & Hossan, M. R. (2007). Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 274–278.
3. Kundrák, J., Szabó, G., & Markopoulos, A. P. (2016). Numerical Investigation of the Influence of Tool Rake Angle on Residual Stresses in Precision Hard Turning. *Key Engineering Materials*, 686, 68–73.
4. Stakhiv, N. E., Devin, L. N., Petrusha, I. A., & Osipov, A. S. (2009). Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *Journal of Superhard Materials*, 31(3), 196–202.
5. Манохін, А. С. Інструмент, виготовлений із порошків кубічного нітриду бору з CVD покриттям / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко, М. П. Семенко, Г. А. Петасюк, А. Г. Филипович, С. Ан. Клименко, Ю. Е. Рижов // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – К. : ІНМ НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 305–314.
6. Манохін, А. С. Вплив коефіцієнту тертя на параметри механіки контактної взаємодії у зоні різання загартованої сталі інструментом із PcBN / А. С. Манохін, С. А. Клименко, А. О. Чумак, Ю. Е. Рижов // Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті : мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р., м. Київ. – К. : АТМ України, 2024. – С.
7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimenko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // *J. Superhard Mat.* – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135

References (transliterated):

1. Manokhin, A.S. Pidvyshchennia produktyvnosti chystovoho tochinnia zahartovanykh stalei kosokutnym odnokromochnym instrumentom z PNTM na osnovi KNB : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk / A.S. Manokhin. – K. : INM im. V.M. Bakulia NAN Ukrainy, 2009. – 21 s.
2. Qian, L., & Hossan, M. R. (2007). Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 274–278.
3. Kundrák, J., Szabó, G., & Markopoulos, A. P. (2016). Numerical Investigation of the Influence of Tool Rake Angle on Residual Stresses in Precision Hard Turning. *Key Engineering Materials*, 686, 68–73.
4. Stakhiv, N. E., Devin, L. N., Petrusha, I. A., & Osipov, A. S. (2009). Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *Journal of Superhard Materials*, 31(3), 196–202.
5. Manokhin, A.S., Melniichuk, Yu.O., Klymenko, S.A., Semenko, M.P., Petasiuk, H.A., Filipovych, A.H., Klymenko, S.An., Ryzhov, Yu.E. Instrument, vyhotovleni iz poroshkiv kubichnoho nitridu boru z CVD pokryttiam / A.S. Manokhin, Yu.O. Melniichuk, S.A. Klymenko, M.P. Semenko, H.A. Petasiuk, A.H. Filipovych, S.An. Klymenko, Yu.E. Ryzhov // *Instrumentalne materialoznavstvo : zb. nauk. prats.* – K. : INM NAN Ukrainy, 2023. – Vyp. 26. – S. 305–314.
6. Manokhin, A.S., Klymenko, S.A., Chumak, A.O., Ryzhov, Yu.E. Vplyv koefitsientu tertia na parametry mekhaniky kontaktnoi vzaiedodii u zoni rizannia zahartovanoi stali instrumentom iz PcBN / A.S. Manokhin, S.A. Klymenko, A.O.

Chumak, Yu.E. Ryzhov // Suchasni pytannia vyrobnytstva i remontu v promyslovosti ta na transporte : mat. 24-ho Mizhnarod. nauk.-tekh. seminaru, 26–27 bereznia 2024 r., m. Kyiv. – K. : ATM Ukrainy, 2024. – S.

7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimenko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // J. Superhard Mat. – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135

Надійшла (received) 06.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Sergii) – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України з наукової роботи, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. E-mail: atmu@meta.ua.

Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. E-mail: the.manokhin@gmail.com

Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatolii) – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>. E-mail: chumak1826ar@gmail.com

Копейкіна Марина Юріївна (Kopeikina Maryna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. E-mail: atmu1@meta.ua

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Serhii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, пр. Перемоги, 37, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. E-mail: alcon1202@ukr.net

ДЕРГОУСОВ В. М., ПЕРМЯКОВ О. А.

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

Автори, маючи кожен свій досвід наукової та практичної діяльності і накопичені знання з технології машинобудування, поставили собі за мету узагальнення та оцінку нових можливостей до проектування технологічних процесів виготовлення зубчастих передач редукторів очисних вугільних комбайнів нового покоління. Розглянуто особливості видобутку вугілля, технічних вимог до створення відповідальних вузлів очисних вугільних комбайнів, що забезпечують ефективність роботи, технологічні новації, які забезпечують якість і знижують трудомісткість виготовлення та складання.

Ключові слова: технологічна підготовка виробництва, дрібносерійне виробництво, очисний вугільний комбайн, редуктор різання, зубчаста передача, точність, якість, рівень шуму.

DERGOUZOV V., PERMYAKOV O.

ON THE FEATURES OF MANUFACTURING CUTTING GEARBOXES FOR COAL MINERS IN SMALL-SCALE PRODUCTION CONDITIONS.

The authors, each having their own experience in scientific and practical activities and accumulated knowledge in mechanical engineering technology, aimed to summarize and assess new possibilities for designing technological processes for manufacturing gear transmissions of coal mining shearers of a new generation. The features of coal mining, technical requirements for creating critical units of coal mining shearers that ensure operational efficiency, and technological innovations that ensure quality and reduce the labor intensity of manufacturing and assembly are considered.

Keywords: technological preparation of production, small-scale production, mining coal combine, cutting gearbox, gear drive, accuracy, quality, noise level.

Вступ. Україна володіє значними запасами кам'яного вугілля — одним із ключових видів палива для промисловості та енергетики. У відповідності з Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (зі змінами від 29.01.2021 № 1162-IX, а саме п.4 статті 3 закону - раціональне природокористування) стоїть актуальне питання пов'язане зі збільшенням потенціалу вугільної промисловості України шляхом створення вугільних комбайнів нового покоління. Виробництво обладнання для вугільної промисловості – це складний наукомісткий та комплексний технологічний процес. Для ефективного вирішення зазначеної проблеми потрібен комплексний підхід з урахування всіх особливостей створення сучасного обладнання на всіх етапах життєвого циклу від дослідно-конструкторських робіт і проектування, технологічної підготовки виробництва та самого виробництва в умовах потрібної серійності до введення в експлуатацію із забезпеченням системи технічного супроводу та обслуговування.

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

Характеристики вугільних пластів та вимоги до вугільнодобувних комбайнів нового покоління.

Сучасний видобуток кам'яного вугілля в Україні здійснюється переважно підземним способом через шахти. Глибина залягання пластів може сягати 1200-1500 м, що ускладнює процес.

Вугільний пласт — форма залягання вкопного вугілля у вигляді плито- і лінзоподібних тіл із невеликою (порівняно з площею поширення) потужністю. Вугільні пласти можуть мати просту (рідше) та складну будову з багаторазовим чергуванням шарів вугілля і породних прошарків, частими геологічними порушеннями [1].

Гіпсометрія - метод відображення на географічних картах рельєфу земної поверхні та залягання поверхні контакту покладу корисної копалини з вмисними породами за допомогою горизонталей або ізогіпс. Гіпсометрія вугільного пласта на відміну від інших характеристик пласта, таких як нормальна потужність, зольність, теплота згоряння та інших показників якості вугілля, висотні позначки пласта змінюються не за лінійним законом (з неспокійною гіпсометрією). Він є одним з найбільш значущих гірничо-геологічних факторів, що багато в чому визначає спосіб і технологічну схему видобутку вугілля, досягаються техніко-економічні показники роботи гірничого підприємства та повноту вилучення корисних копалин з надр.

Потужність вугільного пласта – це певна відстань по нормалі між покрівлею пласта та його підшовою, а також відстань між висячими та лежачими боками лінз, жил та інших геологічних тіл. За потужністю пласти діляться на дуже тонкі (до 0,7 м), тонкі (від 0,71 до 1,2 м), середньої потужності (від 1,21 до 3,5 м) і потужні (понад 3,5 м). *Кут падіння вугільного пласта* — кут між пластом і горизонтальною площиною. Відповідно до Правил технічної експлуатації вугільні пласти за кутом падіння поділяються на положисті (до 18°), похилі (від 19 до 35°), крутопохилі (від 36 до 55°) і круті (від 56 до 90°). Потужність і кут падіння вугільних пластів значною мірою обумовлюють систему його розробки і способи управління покрівлею в очисних вибоях, механізацію очисних робіт тощо.

Характеристики зруйновності вугільного пласта відображають здатність вугільних пластів протистояти впливу ріжучого інструмента виймальних машин, що залежать від природно-генетичних і гірничотехнічних чинників.

До числа таких характеристик відносять: опірність вугільного пласта різанню в різних зонах по ширині захоплення виконавчих органів виймальної машини, взаємопов'язані показники крихкості пласта при різанні і здатності вугілля до подрібнення, показник здатності пласта руйнуватися (показник зруйнованості пласта).

Опірність вугільного пласта різанню (A_p) – характеристика зруйнованості вугільного пласта, що оцінюється як приріст сили різання на різці на одиницю товщини стружки при використанні еталонного приладу ДКС – динамометра крупного сколу. Опірність вугільного пласта різанню є досить стабільною і тому використовується як основний параметр при класифікації вугілля за опірністю різанню. Опірність різанню є випадковою величиною і у межах смуги, що виймається мінливістю цієї випадкової величини, як правило, добре описується нормальними статистичними розподілами. В Україні розподіл промислових запасів вугілля за параметром A_p такий:

A_p , кН/м	до 120	120-240	240-360	Понад 360
Частка запасів вугілля, %	40,4	48,1	10,6	0,9

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

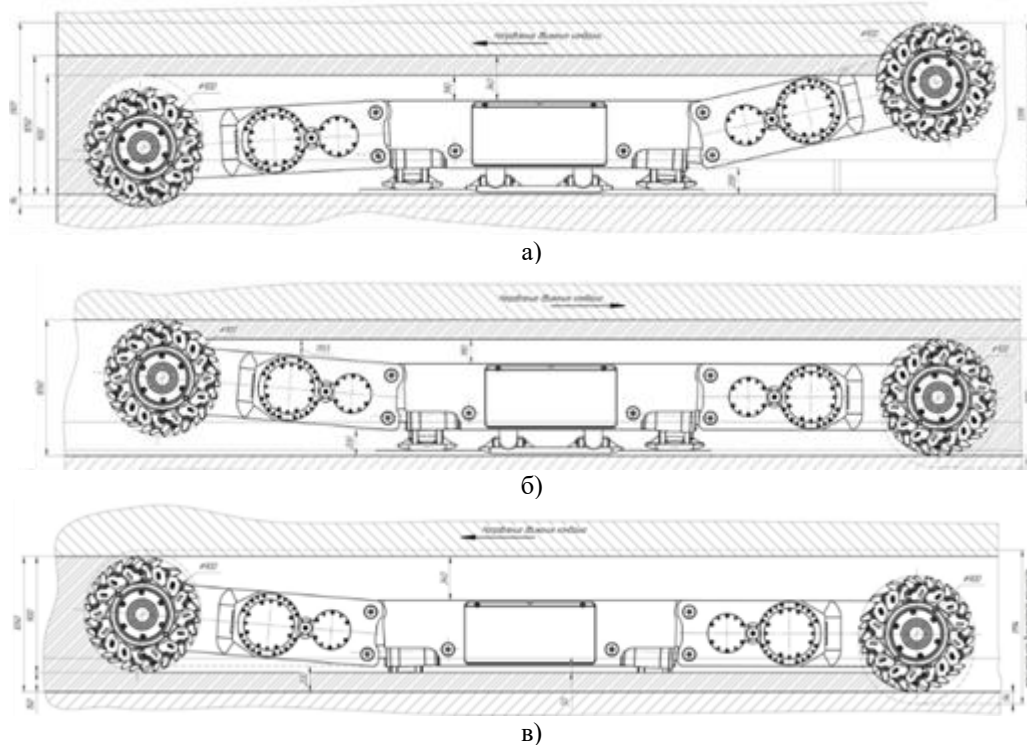


Рис. 1 - Схеми роботи очисних комбайнів

- а) — повний діапазон вийманої потужності
 б) — діапазон вийманої потужності, спосіб 1 (з забійною лижею)
 в) — діапазон вийманої потужності, спосіб 2 (без забійної лижі)

Вугільна промисловість України потребує розробки та впровадження високоефективних очисних комбайнів нового покоління. Для цього необхідно мати сильний науково-інженерний потенціал та потужну інтелектуальну та виробничу базу. Все це є в АТ «ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД «КОРУМ СВІТЛО ШАХТАРЯ» найбільшому підприємстві з випуску гірничошахтного обладнання, одному з найстаріших підприємств вугільної галузі України (у 2021 році заводу виповнилося 130 років). Діяльність підприємства здійснюється за замкненим циклом: від дослідження, проектування, підготовки виробництва, виробництва до шефмонтажу та техобслуговування поставленого обладнання. Гірничошахтне обладнання, що випускається заводом, відповідає вимогам безпеки, має дозвіл Держпраці України на застосування у вугільних шахтах, небезпечних по газу та/або пілі.

За результатами аналізу характеристик вугільних пластів, які підлягають видобутку на шахтах України було сформульовані вимоги до вугільнодобувних комбайнів нового покоління:

- 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;
- підвищення енергоозброєності приводу різання до 500 кВт;
- агрегатно-модульна конструкція та повна уніфікація редукторів різання (без лівого/правого виконання);
- полегшено складання/розбирання основних вузлів комбайна;
- можливість демонтажу електродвигунів без розстикування комбайна;
- можливість відпрацювання лав довжиною до 300 м.

Комбайн вугільний очисний як об'єкт виробництва. Проведені науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи дозволили створити високоефективну конструкцію очисного комбайна УКД200-500 з техніко-економічними показниками на рівні і краще світових зразків та забезпечити його серійне виробництво з гарантією стабільної якості, високої продуктивності та зниження трудомісткості виготовлення [6]. Комбайн очисний УКД200-500 призначений для механізованого вилучення вугілля у складі очисних комплексів, в очисних вибоях пологих і похилих пластів потужністю 0,85-1,5м, що рухаються по простяганню з кутами нахилу до 35°, а також по повстанню та падінню з кута 10°, при опірності вугілля різання до 480 кН/м. Очисний комбайн УКД200-500 є універсальною машиною, яка може працювати у складі множини очисних комплексів. Компонувку комбайна УКД200-500 наведено на рис.2.

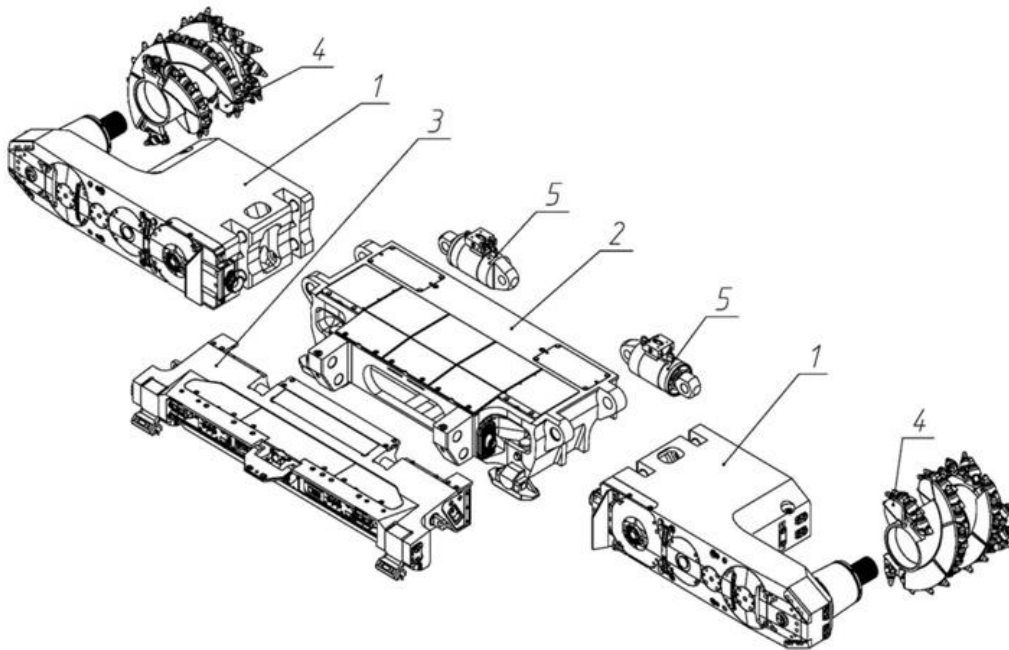


Рис. 2 – Компонувка очисного комбайна УКД200-500

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

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

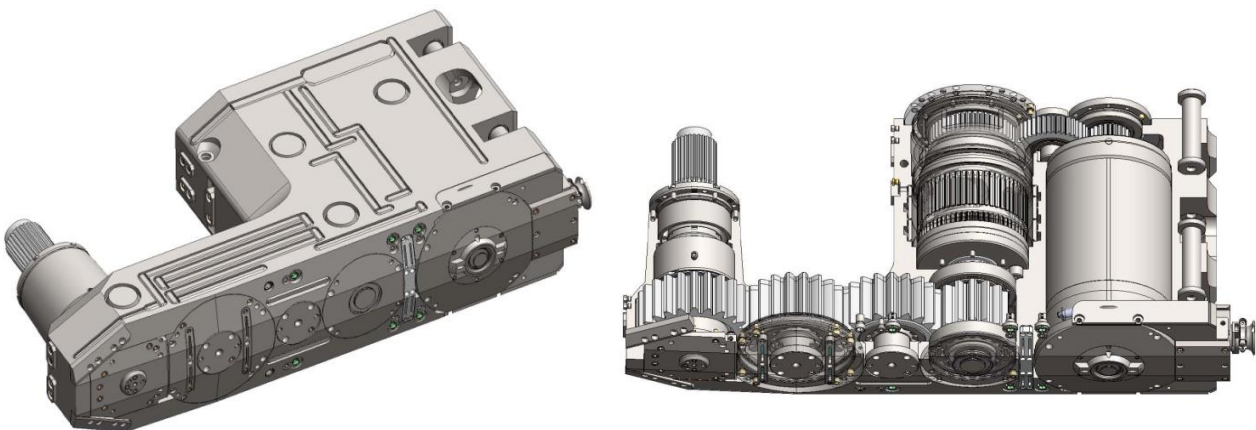


Рис. 3 – Ріжуча частина очисного комбайна УКД200-500

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

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

Матеріал зубчастих коліс зовнішнього зачеплення Сталь 20X2H4АШ, епіциклу планетарного ступеня Сталь 40ХН. Маса ріжучої частини із двигуном – 4700 кг.

Від надійності та довговічності ріжучої частини, а саме її зубчастих передач, залежить надійність та довговічність роботи комбайна в цілому. Виходячи з цього, у процесі проєктування, а також надалі, з урахуванням досвіду експлуатації, було виконано великий обсяг розрахунків його основних деталей на міцність та витривалість.

При виготовленні приводів шахтних комбайнів, виникають проблеми технологічного забезпечення якості обробки зубчастих передач та складання редукторів в умовах дрібносерійного виробництва [7-10].

Організаційно-технологічні можливості виробництва. Виробничі потужності, сучасне високопродуктивне обладнання, розвинена випробувальна база дозволяють заводу випускати продукцію високої якості та забезпечувати її надійність та безпеку експлуатації у вугільних, сланцевих шахтах та калійних копальнях. Верстатний парк складає близько 500 одиниць. У виробничих цехах та лабораторіях АТ «ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД «КОРУМ СВІТЛО ШАХТАРЯ» у достатній кількості є стенди, пристрої та прилади для вимірювань та випробувань при контролі якості виробів. Стенди піддаються переатестації у терміни, передбачені графіками атестації, прилади мають перевірені свідоцтва. Металофізичні та металографічні дослідження, хімічні аналізи та дослідження, а також механічні випробування виконуються лабораторією СШ Департаменту управління якістю та невідповідностями.

З використанням методів імітаційного моделювання удосконалено організаційно-технологічну структуру та проведена необхідна модернізація виробництва на основі рекомендацій з впровадження сучасних методів отримання заготовок та механічної обробки, нового ефективного технологічного обладнання, що у сукупності дозволило забезпечити гарантовано стабільну якість в умовах дрібносерійного виробництва, високу продуктивність та зниження трудомісткості виготовлення.

В заготівельному виробництві для відливки великогабаритних конструкцій було впроваджено нову ділянку холоднотвердіючих сумішей, в якій міститься формувальна лінія «Омега» з вибивним комплексом GAMMA 9LL (Великобританія) та ділянка регенерації, індукційно-плавильний комплекс INDEMAX (Туреччина). Це дозволило суттєво зменшити металомісткість виробів, забезпечити стабільну якість та створити безвідходну технологію яка виключає відходи допоміжних матеріалів. На рис.4 показано заготовки, які отримані за новою технологією.



Рис. 4 – Заготовки корпусних деталей комбайну

В механоскладальному виробництві при виготовленні вузлів комбайну було проведено модернізацію та переоснащення шляхом впровадження сучасних верстатів з ЧПК TOS Varndorf (Чехія) та DOOSAN DBC160 (Південна Корея). Це дозволило підвистити продуктивність обробки, забезпечити якість, технологічну гнучкість та стабільність отримання результату. На рис.5 показано обробку корпусу різання комбайну на верстаті з ЧПК TOS Varndorf.

Для обробки зубчастих коліс впроваджено інноваційні технології з використанням прогресивного металорізального інструменту. Розроблені новітні технології профільного шліфування зубчастих коліс з використанням високопористого шліфувального алмазно-абразивного інструменту (рис.6) та технології його правки алмазними правлячими роликками. Така технологія реалізована шляхом впровадження сучасних верстатів HOFLEER RAPID 1250 (Німеччина) та дозволяє порівняно з іншими методами обробки суттєво

підвищити зносостійкість, знизити коефіцієнт тертя, підвищити точність обробки та знизити висотні параметри шорсткості зубчастих коліс і, тим самим, підвищити надійність і ресурс зубчастих передач.



Рис. 5 – Обробка корпусу різання на верстаті з ЧПК TOS Varndorf

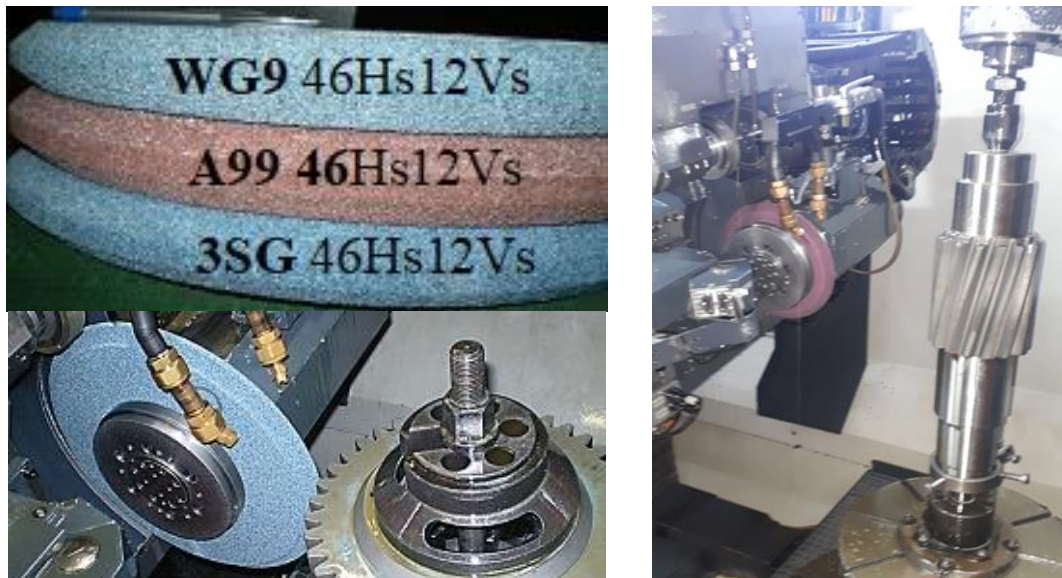


Рис. 6 – Високопористі шліфувальні інструменти з монокристалічних абразивних матеріалів та зубшліфування кругом з рубин-корунду



Рис.7 – Деталі складального комплексу та результат складання

Оскільки від надійності та довговічності ріжучої частини комбайну залежить надійність та довговічність роботи комбайна в цілому виготовлення всіх деталей та складання вузлів повинно виконуватись з високою точністю. На рис.7 наведені деталі складального комплексу та результат складання.

Для контролю деталей при їх виготовленні використовуються як стандартні, так і спеціальні вимірювальні прилади та інструменти. Для підвищення якості продукції та підвищення ефективності виробництва впроваджено контроль деталей на 3-х координатній вимірювальній машині GLOBAL12.22.10 італійсько-швейцарського виробництва (рис.8).



Рис. 8 – Контроль деталей на вимірювальній машині GLOBAL12.22.10

Забезпечення малошумності редукторів комбайну. Сучасні промислові редуктори є ключовими компонентами механічних систем передачі потужності, але їхня робота неминуче супроводжується генерацією шуму та вібрації. Ці фактори суттєво впливають на експлуатаційні характеристики обладнання, комфорт роботи персоналу та дотримання екологічних норм [11, 12]. Надмірний шум вказує на тертя, неспіввісність або зношування, які можуть скоротити термін служби редукторів. Тривалий вплив сильного шуму також створює некомфортне та небезпечне робоче середовище.

Згідно з останніми дослідженнями, основними джерелами шуму та вібрації в редукторах є вали, зубчасті колеса та підшипники. Згідно з AGMA 10FTM10-2010, міжнародним стандартом оцінки шуму зубчастих передач, навіть мікроскопічні дефекти в конструкції зубчастих передач можуть викликати вимірні рівні шуму. 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.

Зубчасті передачі є одним з найбільш поширених елементів механічних приводів, що забезпечують передачу обертального руху та зміну моменту, що крутить. Однак за всіх своїх переваг, вони стають джерелом значного шуму та вібрації, що може негативно позначатися на роботі обладнання, умовах праці та довговічності механізмів.

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

Зрозуміло, що шлях нівелювання вказаних недоліків при використанні прямозубих зубчастих передач традиційний — забезпечення плавності ходу за рахунок підвищення точності та якості виготовлення зубчастих передач і складання редукторів. Крім того є необхідність розглядання деяких зв'язних та інноваційних підходів до створення ефективних зубчастих передач, які в комплексі можуть дати синергетичний ефект.

Добре відомі основні засоби боротьби з шумом: перехід на косозубі шестерні, застосування бочкоподібного зуба, збільшення коефіцієнта перекриття, вирівнювання навантажень уздовж ширини зубчастого вінця, удосконалення зубообробних операцій, покращення конфігурацій кришок і корпусних частин.

Виходячи з конструктивних методів зниження шуму, які ґрунтуються на оптимізації геометрії зубчастих коліс та параметрів зачеплення (модифікація профілю зубів, оптимізація коефіцієнта перекриття, асиметричні профілі зубів, вибір оптимального числа зубів та модуля, тощо) можна запропонувати наступне.

З метою зменшення ударних сил при вході зубів в зачеплення та виході з нього може застосовуватися профільна модифікація головки зуба (фланкування). Фланкування зменшує ударні сили, пов'язані з деформацією зубів та похибками основного кроку. Фланкування полягає в навмисному відхиленні профілю зубців від теоретичної форми для зменшення динамічних навантажень, викликаних похибками основного кроку та пружною деформацією зубців. Метою фланкування є не зміна геометрії зачеплення, а покращення реального процесу зачеплення.

Застосування коліс із фланкованими зубцями значно покращує плавність роботи передачі, забезпечуючи більш плавний вхід зубців у зачеплення та вихід з нього. Фланкування також сприяє утворенню масляної клини між взаємодіючими зубцями, що разом із пружною деформацією зубців знижує відносні прискорення коліс, динамічні навантаження та шум у передачі. Глибина фланкування визначається з урахуванням навантаження зубчастих коліс, їхніх матеріалів, термічної обробки та точності виготовлення. Глибина фланкування повинна забезпечити відсутність кромкового удару, тобто усунути участь у роботі кромки зубів, що входять і виходять із зачеплення. Відсутність кромкового зачеплення забезпечується, якщо глибина фланкування не менша за алгебраїчну суму похибок зачеплення та значення пружних деформацій зубців попередньої пари в момент вступу в зачеплення наступної пари.

Завдяки фланкуванню похибки основного кроку переводяться у похибки профілю, час дії яких значно більший. Цим самим зменшуються відносні прискорення, динамічні навантаження, вібрації та шум зубчастої передачі — підвищується плавність роботи. Фланкування виключає можливість дії повної окружної сили на головку зуба — зміщення точки прикладання зусилля вниз (зменшення плеча вигину) відповідно полегшує умови роботи зуба.

Раніш вважалось, що фланкування можна здійснити будь-яким способом обробки зубів, але найефективніше воно тоді, коли фланкування виконується під час фінішних операцій, оскільки викривлення профілю та кроків при операціях, що слідує за зубонарізанням, значною мірою ліквідують ефект фланкування. Крім того, була потреба у виготовленні дорогого зуборізного інструменту. Сучасні технологічні можливості переходу від зубофрезерування на електроерозійну обробку будь-яких профілів зубів ці обмеження та недоліки нівелюють.

Для виготовлення зубчастих коліс зовнішнього зачеплення редуктору очисного вугільного комбайну використовується сталь 20X2H4A — це високоякісна легована конструкційна сталь, яка належить до групи нікелевих хромомолібденових сталей. Вона поєднує високу міцність, ударну в'язкість, зносостійкість і термостійкість, що робить її незамінною для виготовлення відповідальних вузлів і деталей, які працюють у складних умовах інтенсивного навантаження. Завдяки своїм унікальним характеристикам, сталь 20X2H4A широко використовується у виробництві високоміцних шестерень, валів, осей, шпинделів, які зазнають динамічних і ударних навантажень.

Високотверді матеріали погано приробляються, тому вони потребують підвищеної точності виготовлення, підвищеної жорсткості валів і опор, само для них бажано фланкування зубів прямозубих коліс. Для забезпечення рівномірності приробітку зубчастих коліс та покращення експлуатаційних характеристик зубчастих передач можна використати рекомендації патенту [2]. В ньому запропонований спосіб забезпечення контактування кожного зуба ведучої шестерні з кожним зубом веденого колеса в певній послідовності.

Застосування запропонованого в патенті алгоритму розрахунку підвищення зносостійкості, довговічності та покращення плавності роботи за рахунок створення і прогнозування певних передавальних чисел, які визначають некратність зачеплення та забезпечують роботу зубів ведучого зубчастого колеса з усіма зубами веденого зубчастого колеса, може дозволити прискорити рівномірне прироблення зчеплених зубчастих коліс, виправити дефекти при виготовленні та збиранні зубчастих передач, зменшити вібрації на 20%, шум на 15%, підвищити плавність роботи зубчастих передач на 20%, стабілізувати та усунути можливість заїдань при великих швидкостях ковзання, підвищити зносостійкість на 50%, значно зменшити можливість утворення мікро-пітінгу.

Виникає актуальне науково-практичне завдання виготовлення та дослідження зубчастих передач з профільною модифікацією головки зуба (фланкуванням) з некратністю зачеплення як елементної бази створення та модернізації редукторів ріжучої частини очисних комбайнів. Вразі отримання позитивного ефекту від випробування подібних передач (зменшення вібрацій, шуму, підвищення плавності роботи) можливе удосконалення технологічних процесів виготовлення таких зубчастих передач та складання редукторів, що в перспективі може дати переваги у подальшому забезпеченні ефективності та конкурентоспроможності очисних вугільних комбайнів нового покоління.

Висновки. На основі системного аналізу особливостей видобутку вугілля, технічних вимог до створення відповідальних вузлів, що забезпечують ефективність роботи очисних вугільних комбайнів нового покоління, організаційно-технологічних можливостей заводу розглянуто та впроваджено технологічні новації, які забезпечують якість та ефективність виготовлення відповідальних вузлів. Заплановано шляхи нівелювання недоліків при використанні прямозубих зубчастих передач редукторів різання за рахунок профільної модифікації головки зуба (фланкування) з некратністю зачеплення, що може привести до зменшення вібрацій, шуму, підвищення плавності їхньої роботи. Можливості сучасних технологічних методів формоутворення зубчастих коліс у сукупності зі звісними та інноваційними підходами до створення ефективних зубчастих передач в комплексі дадуть синергетичний ефект, який забезпечить подальший розвиток приводів, ефективні та високі конкурентоспроможні показники вугільних комбайнів нового покоління.

Список літератури:

1. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 с. — ISBN 966-7804-14-3.
2. Декларативний пат. на корисну модель u 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.Кондратюк. — 4 с. : ил
3. Пат. на корисну модель 104899 UA, МПК G01M 13/02, F16H 57/01. Стенд для випробування коробок передач /Б.В.Долішній, М.Й.Бурда, О.О.Клочко, Є.В.Остапович. — № u2015 07938; заявл. 10.08.15; опубл. 25.02.16, Бюл.№4. — 4с. : ил.
4. Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears /Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus).
5. Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. //Journal of Mechanical Engineering - Strojnicky casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. — P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>
6. 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.
7. Обработка зубчатых колес редукторов угледобывающих комбайнов /О.М.Ковальчук, В.М.Дергоусов, В.В.Нежебовський, О.А.Пермяков, О.О.Клочко, С.В. ябченко, Г.В.Серета //Оборудование и инструмент для

професіоналов: *Международный информационно-технический журнал*. – Харьков: ИИД «ЦентрИнформ», 2021, № 5(238), - С. 38-39.

8. 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.

9. Способи підвищення зносостійкості зубчастих циліндричних передач з обліком некротного зубчатого зачеплення /Клочко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Пермяков Є.О., Антоненко Я.С., Мироненко О.Є. //Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20 – 22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С. 54–55. ISBN 978-617-7889-45-7.

10. 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.

11. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки.

12. ДСТУ ГОСТ 23941:2004 Шум машин. Методи визначання шумових характеристик. Загальні вимоги.

References (transliterated):

1. Mala hirnycha entsyklopediia: u 3 t. / za red. V. S. Biletskoho. — D. : Donbas, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 s. — ISBN 966-7804-14-3.

2. Deklaratyvnyi pat. na korynsnu model u 2018 02191 UA, MPK 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.Skorin, O.L.Kondratiuk. – 4 s. : yl

3. Pat. na korynsnu model 104899 UA, MPK G01M 13/02, F16H 57/01. Stend dlia vyprovovuvannia korobok peredach /B.V.Dolishnyi, M.I.Burda, O.O.Klochko, Ye.V.Ostapovych. – № u2015 07938; zaiavl. 10.08.15; opubl. 25.02.16, Biul.№4. – 4s. : yl.

4. Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears /Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus).

5. Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. //Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>

6. Stvorennia ta osvoinnna seriinoho vyrobnytstva ochysnykh kombainiv novoho pokolinnia dlia hirnychodobuvnoi promyslovosti. Ukrainy /O.M.Kovalchuk, R.A. Berezhnyi, O.O. Klochko, V.V. Nezhebovskiyi, 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.

7. Obrobka zubchastykh kolis reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv /O.M.Kovalchuk, V.M.Derhousov, V.V.Nezhebovskiyi, 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.

8. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia /Nezhebovskiyi V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. //Visnyk Natsionalnogo tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

9. Spособы pidvyshchennia znosostiikosti zubchastykh tsylindrychnykh peredach z oblikom nekratnogo zubchatoho zacheplennia /Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Permiakov Ye.O., Antonenko Ya.S., Myronenko O.Ie. //Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XXI Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii 20 – 22 chervnia 2023 roku / za zah. red. V. D. Kovalova. — Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2023. – S. 54–55. ISBN 978-617-7889-45-7.

10. Pro tekhnolohichne zabezpechennia vyhotovlennia zubchastykh peredach reduktoriv vuhilnykh kombainiv v umovakh dribnoseriinoho vyrobnytstva /Derhousov V.M., Nezhebovskiyi V.V., Klochko O.O., Permiakov O.A. //Novi ta netradytiini tekhnolohii v resurso - ta enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii, 6-7 hrudnia 2023 r., m. Odesa. – Odesa: 2023. – S. 91 –92.

11. HOST 12.1.003-83. SSBT. Shum. Zahalni vymohy bezpeky.

12. DSTU HOST 23941:2004 Shum mashyn. Metody vyznachannia shumovykh kharakterystyk. Zahalni vymohy.

Надійшла (received) 10.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

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

Пермяков Олександр Анатолійович (Oleksandr Permyakov) – 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, ORCID: 0000-0002-9589-0194.

ГАСАНОВ М. І., ОХРИМЕНКО О. А., КЛОЧКО О. О., ФЕДОРЕНКО В. С., ЛАНЬО К. Р., ГОРБУЛИК В. І.

ДИСИПАТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЗУБООБРОБЦІ ВАЖКОНАТАЖЕНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Дисипативне моделювання технологічних систем при зубообробці з метою передбачення параметрів якості сформованого поверхневого шару формується на основі математичної моделі, яка враховує як технологічні режими та геометричні характеристики процесу, так і фізико-механічні властивості матеріалу. Основою для моделювання слугує перехід пластичного витіснення матеріалу оброблюваної поверхні зубчастого колеса у взаємодії з інтегральним параметром, що описує стан поверхневого шару через показник шорсткості профілю. У роботі проаналізовано технологічні чинники, що впливають на досягнення необхідної якості обробленої поверхні, зокрема — залежність від кута ковзання під час процесу фрезерування зубчастих елементів. У межах дослідження було здійснено як теоретичний аналіз, так і експериментальну перевірку, спрямовані на встановлення оптимального значення кута ковзання, при якому забезпечується стабільний характер процесу різання, досягається необхідна зносостійкість інструменту та гарантується висока якість оброблюваної поверхні. При цьому важливим орієнтиром виступає максимальний контактний кут, що описує взаємодію зуба фрези з заготовкою. На основі співвідношення між цими кутами було сформовано коефіцієнт ефективності формування поверхневого шару, який дозволяє кількісно оцінити якість результату фрезерування залежно від геометрії та динаміки процесу.

Ключові слова: дисипативне моделювання, механічна обробка, технологічні системи, пластичне витіснення, кута ковзання, зубофрезерування, зубчасті колеса, поверхневий шар, якість.

M. HASANOV, O. OKHRIMENKO, O. KLOCHKO, V. FEDORENKO, K. LANO, V. GORBULYK DISSIPATIVE MODELING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN GEAR MACHINING OF HEAVY-LOADED GEARS

Dissipative modeling of technological systems in gear machining, aimed at predicting the quality parameters of the formed surface layer, is based on a mathematical model that takes into account both the technological modes and geometric characteristics of the process, as well as the physico-mechanical properties of the material. The modeling approach is founded on the transition of plastic displacement of the material of the machined gear surface, in interaction with an integral parameter that describes the surface condition through a profile roughness index. The study analyzes technological factors influencing the achievement of the required surface quality, particularly the dependence on the sliding angle during the gear teeth milling process. The research includes both theoretical analysis and experimental validation, aimed at determining the optimal sliding angle that ensures a stable cutting process, provides the necessary tool wear resistance, and guarantees high surface quality. An important reference parameter is the maximum contact angle, which characterizes the interaction between the cutter tooth and the workpiece. Based on the ratio between these angles, an efficiency coefficient for surface layer formation was developed, enabling a quantitative assessment of machining quality depending on the geometry and dynamics of the process.

Key words: dissipative modeling, machining, technological systems, plastic displacement, sliding angle, gear hobbing, gears, surface layer, quality.

Вступ. У процесі високошвидкісного зубофрезерування контактні взаємодії між стружкою та ріжучим інструментом є надзвичайно складними та залежать від характеру навантаження на ріжучу частину інструменту, а також від локалізації зон пластичної деформації, що виникають у зоні вторинної деформації матеріалу. Для детального розуміння механізмів тертя, які реалізуються при обробці із застосуванням високошвидкісного зубофрезерування, необхідно застосовувати комплексний підхід. Це включає використання даних з матеріалознавства, фізики твердого тіла, прикладної механіки, методів фізико-хімічного аналізу, а також математичного і фізичного моделювання. У цьому контексті система “інструмент – заготовка” розглядається як багатофакторна динамічна система зі складною структурою взаємодій на мікро- та макрорівнях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують різноманітні наукові концепції, що пояснюють природу контактної взаємодії між матеріалами інструменту та оброблюваної деталі в умовах високошвидкісної обробки [1–5].

Перші спроби встановити залежність між середнім коефіцієнтом тертя μ та швидкістю різання V були зроблені Розенбергом А.М. та Єр'омінін А.Н. У своїй роботі вони виявили, що значення μ досягає максимуму при температурному діапазоні 550–600 °С, що спостерігається при відповідній швидкості різання [3]. Згодом Зорев М.М. [2] критично переосмислив ці результати, встановивши, що реальне максимум значення μ досягається вже при температурі близько 300 °С. Це пояснюється недооцінкою впливу наросту стружки на зміну ефективного переднього кута різання та напрямку сходження стружки в попередньому дослідженні.

На підставі аналізу [2], можна зробити висновок, що середній коефіцієнт тертя μ значною мірою залежить від нормального контактного тиску q_n , який діє на робочій грані інструмента. У той самий час питома сила тертя q_x зберігає відносну інваріантність щодо режимів обробки, температури різання та інших умов, оскільки є властивістю самого оброблюваного матеріалу.

Ураховуючи наведене, варто зазначити, що швидкість різання V , глибина зрізу a та передній кут γ ріжучого елемента мають критичний вплив на величину коефіцієнта тертя. У контексті високошвидкісного фрезерування інваріантність питомої сили тертя q_x пов'язують із сукупним впливом температурного поля та швидкості процесу.

© М. І. Гасанов, О. А. Охріменко, Л. Я. Роп'як, О. О. Клочко, В. С. Федоренко, К. Р. Ланьо, В.І.Горбулік, 2025

Таким чином, параметри q_n та q_x розглядаються як окремі характеристики контактної взаємодії, кожна з яких залежить від різного набору факторів: q_x формується переважно силами пластичного зсуву в зоні контакту, тоді як q_n залежить від довжини реального контакту між поверхнями.

Для конкретного матеріалу деталі питома сила тертя залишається сталою, що дозволяє зробити висновок: зміни у значенні коефіцієнта тертя μ відбуваються головним чином через варіації в контактному тиску. Унаслідок цього всі зовнішні технологічні впливи (режими різання, геометрія інструменту тощо) будуть позначатися на μ лише в тій мірі, в якій вони змінюють середній контактний тиск q_n .

Варто також підкреслити, що для різних матеріалів заготовки будуть відповідати окремі криві залежності виду $\mu = f(q_n)$, оскільки q_x має індивідуальне значення, притаманне кожному матеріалу, що і формує характер тертя в конкретних умовах обробки.

Величина середнього коефіцієнта тертя в умовах високошвидкісного зубофрезерування не повинна тлумачитись як звичайний коефіцієнт тертя в класичному механічному розумінні [2]. Цей показник є усередненою характеристикою, що відображає як стан напружень у зоні контакту з пластичною деформацією, так і ефекти зовнішнього тертя. У практиці розрахунків при аналізі контактної взаємодії враховується вся контактна поверхня, хоча реальний розподіл напружень є складним. У зв'язку з цим середній коефіцієнт тертя доцільно розглядати як інтегральну характеристику загального напружено-деформованого стану у зоні стружкоутворення. За своїм фізичним змістом він може бути співвіднесений із так званим кутом дії, хоча однозначного функціонального зв'язку між ними не існує.

У низці досліджень [3, 4] доведено, що питома сила тертя qF не є функцією температури, а залежить виключно від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Наприклад, М.Ф. Полетіка [4] запропонував емпіричну залежність між qF і дійсним опором розриву матеріалу (S_k), яка має вигляд:

$$m = m_0(N + N_0), \quad (1)$$

Що стосується нормальних напружень q_n , то вони, на відміну від q_x , визначаються геометричними параметрами зони контакту і змінюються залежно від відносної довжини контакту, яка описується як C_a , де C – довжина контакту, а a – товщина зрізаного шару.

Додатково слід зазначити, що у дослідженнях М.Б. Гордона [5] було встановлено, що за умови відсутності наросту на передній поверхні інструменту при високошвидкісному різанні формується режим переважно зовнішнього кінетичного тертя, який у різному ступені модифікується адгезійною взаємодією. Розвиваючи ідеї Б.В. Дерягіна щодо багатфакторної природи тертя, Гордон сформулював математичну модель залежності коефіцієнта тертя μ , що враховує як пластичне зсувне тертя, так і адгезійні компоненти. Ці залежності є основою для подальших теоретичних і числових моделей, які описують тертя в системах "інструмент – оброблюваний матеріал" при різних умовах зубообробки.

$$m = m_0(N + N_0), \quad (2)$$

У поданому контексті параметр μ_0 трактується як базовий (істинний) коефіцієнт тертя, що враховує виключно вплив молекулярно-атомної мікрошорсткості контактуючих поверхонь та не залежить від явищ адгезії. Іншими словами, μ_0 характеризує тертя у випадку повної відсутності міжатомного зчеплення між матеріалами.

Параметр N_0 визначає результуючу силу молекулярного взаємного тяжіння між поверхнями, що взаємодіють, і розраховується за співвідношенням:

$$N_0 = \rho_0 \cdot S_0, \quad (2)$$

де:

- ρ_0 — інтенсивність молекулярної взаємодії на одиницю площі (сила міжатомного тяжіння),
- S_0 — площа фактичного контакту.

Г.І. Єпіфанов [1], досліджуючи природу тертя у високошвидкісних умовах зубофрезерування, дійшов висновку, що роль нормального тиску полягає не в безпосередній участі у формуванні сили тертя, а у створенні умов для виникнення площі контакту внаслідок пластичної деформації при зовнішньому терті (Рис. 1).

На рис. 1 представлено умовну модель взаємодії металевої стружки з передньою поверхнею інструмента під час процесу високошвидкісного різання. У зоні, що прилягає до ріжучої кромки, спостерігається утворення так званих зон високого контактного тиску (ЗВКТ), або ж областей гальмування частинок, які виникають через інтенсивне нагромадження деформацій.

Мета дослідження. Дослідження дисипативного моделювання технологічних систем при зубообробці важконавантажених зубчастих коліс за допомогою нового підходу прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання.

Основна частина. Розрізняються два основні типи контакту між стружкою та інструментом:

- контакт пружного типу (3) — з обмеженим проникненням і відновленням форми після взаємодії;

контакт пластичного типу (СПЛ) — при якому відбувається незворотна деформація матеріалу.\



Рис. 1 – Схема, що демонструє механізм тертя при високошвидкісному зубофрезеруванні

Як показано у дослідженнях [6], виникнення областей високого тиску (ОБТ) обумовлено формуванням особливої деформаційної структури у вигляді вихрового механізму в приконтактних шарах стружки. Ці зони є джерелом розвитку так званої динамічної дисипативної структури – наросту, що утворюється на передній грані інструмента. Наріст, у свою чергу, змінює ефективні геометричні параметри інструмента, що впливає на кут різання, тертя та зношування.

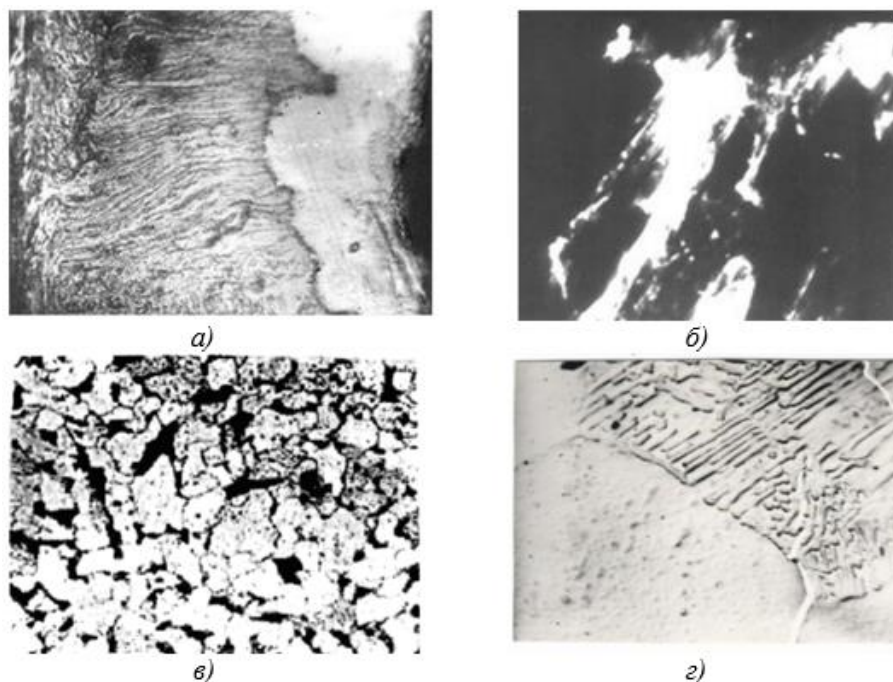


Рис.2 – Мікроструктурні зображення сталі 10 у зоні контакту інструмент–заготовка при високошвидкісному зубофрезеруванні.

На рис. 2 показано наступне:

- а – мікрофотознімок поверхні підшви наросту, збільшення $\times 200$, швидкість різання $V = 40$ м/хв;
- б – характер дислокаційної підструктури в області вторинної пластичної деформації, збільшення $\times 15000$, $V = 40$ м/хв;
- в – первинна (вихідна) мікроструктура до обробки, збільшення $\times 300$;
- г – деталізоване зображення вихідної структури, збільшення $\times 3000$.

На мікрофотознімку (рис. 2, а) зображено структуру металу в зоні контакту підшви наросту, утвореного під час високошвидкісного зубофрезерування. З аналізу зображення видно, що вздовж підшви наросту відбувається істотна трансформація структури деформованого металу. На початковій ділянці присутній

мартенситно-бейнітний стан, який в подальшому змінюється перлітною структурою із зернами, витягнутими у напрямку течії пластичної деформації. У завершальній частині підшви утворюється область феритної фази.

Як видно на рис. 2, б, у зоні вторинного деформування металу, яка прилягає безпосередньо до ріжучого лева, формується фрагментована дислокаційна структура. Фрагменти такої структури зазнають витягування і пластичного зсуву відповідно до напрямку течії матеріалу, однак чітка структура в них не виявляється. Зображення рис. 2, в і г демонструють початкову мікроструктуру сталі 10 при різних ступенях збільшення.

З цього випливає, що при терті в приінструментальній зоні спостерігається інтенсивне вторинне пластичне деформування цементитних включень, їх розщеплення, а також перенесення атомів вуглецю у напрямку до зони різання. Пластини цементиту при цьому повертаються, подрібнюються й орієнтуються відповідно до прикладених зсувних напружень. У результаті формується феритна структура з підвищеною пластичністю (рис. 2, а). Зафіксовані структури, подібні до гартованих, свідчать, що температура у мікрооб'ємах підшви наросту може досягати значень, що перевищують межі фазових перетворень сталей згідно з діаграмою Fe–C.

Щільність дислокацій поблизу феритних зерен в зоні пластичного зсуву досягає критичних значень ($\rho \approx 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Формується коміркова структура, яка витягується у бік ріжучої кромки під впливом локалізованих високих контактних тисків.

Таким чином, зафіксовані локальні структури, характерні для термозміцнення (рис. 3.5, а), слід інтерпретувати як фазові перетворення з утворенням нерівноважних дисипативних структур у зоні різального контакту. Вони виконують роль ефективних каналів дисипації енергії деформаційного процесу.

Аналіз зображень, зокрема рис. 2, а, підтверджує, що зміна коефіцієнта тертя μ із температурою обумовлена структурними й фазовими модифікаціями в приінструментальних шарах. Це призводить до варіації механічних властивостей по довжині зони пластичного контакту: утворення зон з підвищеною пластичністю (феритна фаза) спричиняє зростання площі пластичного контакту (СПЛ) і загальної довжини контакту C , що, своєю чергою, зменшує qN – питомий тиск, але сприяє зростанню середнього коефіцієнта тертя μ .

На рис. 3 представлено результати експериментальних досліджень залежності коефіцієнта тертя та висоти наросту від температури, яка штучно підтримувалась на ріжучій частині без урахування ефекту швидкості деформації. З графіка видно, що як висота наросту H , так і значення коефіцієнта тертя μ досягають максимуму приблизно при температурі 300 °C. Це корелює з відомими даними [8], згідно з якими при температурі близько 300 °C значно підвищується дифузійна рухливість атомів вуглецю в сталях, особливо по міжзернових межах. Як буде продемонстровано в наступних підрозділах на основі квантово-механічного аналізу, поблизу цієї температури також активізуються дифузійні процеси в кобальтовій матриці твердосплавних інструментів.

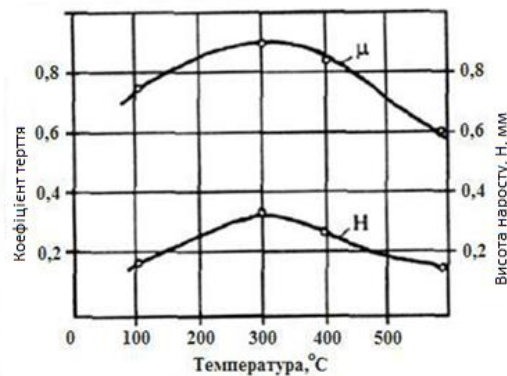


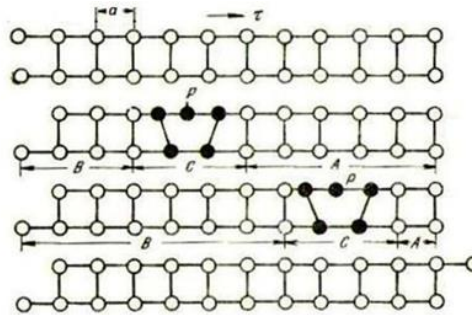
Рис. 3 – Графічна залежність коефіцієнта тертя (μ) та висоти наросту (H) від температури локального нагріву ріжучої частини: інструмент – твердосплавний різець типу ВК8; матеріал – сталь У8; швидкість різання $V = 0,1$ м/хв; глибина різання $a = 0,2$ мм; ширина зони різання $b = 2$ мм

Аналіз результатів мікроструктурних досліджень (рис. 2, а) свідчить про те, що по довжині зони пластичної взаємодії між стружкою та передньою поверхнею інструменту при досягненні швидкості різання, еквівалентної критичній швидкості наростоутворення $V=V_H$ можна виділити дві відмінні області: ділянку інтенсивного зміцнення матеріалу (швидкісна зона гарту) та зону подальшого ослаблення структури (зону розм'якшення).

У випадку невисоких швидкостей різання ($V=V_H$) було зафіксовано, що контактна область пластичної взаємодії між інструментом та стружкою здатна поділятися навіть на три окремі підзони. При цьому зона, яка демонструє максимальні значення мікротвердості, зазвичай локалізована на початку ділянки пластичного контакту. Зона, де відбувається помітне зниження твердості матеріалу, формується наприкінці підшви наросту – саме в тій частині контакту, де температурний вплив досягає свого максимуму по довжині взаємодії між стружкою та ріжучою частиною інструменту [4].

Слід підкреслити, що процес пластичної деформації у зоні тертя має істотно інший характер порівняно з пружною. Вона настільки глибока, що веде до розриву міжатомних зв'язків між сусідніми атомами, які ще до

моменту деформації утворювали стійкі зв'язки. Інакше кажучи, пластична деформація ініціюється тоді, коли локальні напруження у металі досягають критичного рівня, порівняного з теоретичною границею міцності, що становить приблизно 10% від об'ємного модуля стиску ($0,1 \cdot B$). Проте в реальних матеріалах цей поріг значно нижчий через наявність дислокаційних дефектів, які суттєво полегшують початок деформаційного процесу.



*B – початковий стан; б і в – різні стадії зсуву; г – стан після зсуву;
 - ділянку, неперетерпутий ковзання; B – ділянку, на якому зрушення
 вже пройшов; - ділянку максимальних спотворень, створюваних і
 переміщуваний при послідовному розвитку зсуву*

Рис. 4 – Пластичного зсув при дотичному навантаженні

На рисунку 4 представлена узагальнена схема порушення міжатомних зв'язків у кристалічній структурі під дією зовнішнього дотичного навантаження. У випадку прикладення зсувного зусилля, міжатомна відстань, що дорівнює величині a , викликає переміщення атомних шарів у напрямку дії сили, внаслідок чого починається процес локалізованого ковзання з участю дислокацій. Наявність дислокацій у кристалічній решітці обумовлює появу локальних областей, у яких енерговитрати на розрив зв'язків компенсуються шляхом їх часткового відновлення в іншій частині структури.

Коли в матеріалі реалізується ковзання, дислокація також переміщується вздовж відповідної площини зсуву. У спрощеній схемі (рис. 4) дислокаційна лінія розташована перпендикулярно до площини зображення, а її умовне відображення на схемі – точка p . У зоні, де відбувається пластичне зміщення атомів, відстань між шарами зберігається сталою, однак при переході через лінію дислокації воно зменшується до нуля. Таким чином, поблизу лінії дислокації виникає порушення регулярної атомної структури, що відповідає наявності додаткової атомної площини.

З розвитком зсуву у верхній частині кристалічної структури утворюється надлишкова площина атомів, яка формує дислокаційний об'єм. Саме переміщення цієї додаткової напівплощини вздовж площини ковзання й зумовлює виникнення та рух дислокаційної лінії.



Рис. 5 – Графік зміни питомої сили тертя залежно від параметра Еду в умовах високошвидкісної обробки (режим: $V = 100$ м/хв; $S = 0,161$ мм/об)

На рис. 5 продемонстровано, як питомий опір тертю змінюється залежно від дефектної енергії упаковки (Еду) в кристалічних структурах різних металів і сплавів. Енергетичний дефект, що виникає через порушення закономірного чергування щільно розміщених атомів у кристалічній решітці, супроводжується зростанням запасеної енергії. Чим більшим є значення Еду, тим вищою виявляється поверхнева енергія матеріалу, що в свою чергу свідчить про підвищену здатність утворювати міцні міжатомні зв'язки. Як впливає з аналізу графіка, підвищення Еду прямо корелює з ростом питомої сили тертя.

На рис. 6 відображено взаємозв'язок між питомою силою тертя і питомою теплотою плавлення матеріалу. Питомою теплотою плавлення визначає кількість енергії, необхідної для переходу речовини з твердого стану до рідкого. Аналіз показує: зменшення теплового бар'єра (H) сприяє зростанню питомого опору тертю, що вказує на квазірідку або аморфну природу локальних шарів під час інтенсивного тертя.



Рис. 6 – Залежність питомої сили тертя від питомої теплової енергії плавлення в умовах $V = 100$ м/хв, $S = 0,157$ мм/об

Системний аналіз графіків (рис. 5–6) дозволяє стверджувати, що при значному локальному навантаженні в прифрезерній зоні стружки досягається критичний енергетичний рівень, що сприяє аморфізації матеріалу. Під впливом високої швидкості деформацій та температурних градієнтів щільність дислокацій досягає граничних значень, викликаючи фазові перетворення та утворення тимчасових нестабільних структур із подальшою рекристалізацією.

Також спостерігається подібна закономірність і в поведінці коефіцієнта тертя μ : зі зменшенням теплоти плавлення зростає значення μ . Це ще раз підкреслює зв'язок між енергетичними характеристиками матеріалу і його трибологічною поведінкою.

Важливу роль у процесі контактної взаємодії відіграє не лише оброблюваний матеріал, а й характеристики інструменту, зокрема структура та тип твердого сплаву. У зв'язку з цим було проаналізовано щільність електронних станів на поверхні твердосплавного інструментального матеріалу — зокрема, карбиду вольфраму, легованого залізом. У формуванні електронного потенціалу важливу роль відіграють як d-електрони, так і s- та r-електронні стани.

На рис. 7 представлено модельний атомний кластер, що використовувався для обчислення загальної енергії системи та міжатомних взаємодій між шарами Fe та WC методом молекулярної динаміки. Розрахунки проведено із застосуванням методу Basin-Hopping для пошуку глобального мінімуму енергії. Результати показали, що при температурах понад 600 K система втрачає стабільність: міжатомні відстані зменшуються, а повна енергія системи стрімко зростає. Таке зростання пов'язано з імовірним переходом від α -фази до β -фази кобальту, який є основою зв'язувальної фази в більшості твердосплавних інструментів.

У подальшому були виконані квантово-механічні розрахунки з метою визначення повної енергії систем, що включають різні комбінації контактуючих елементів.

Параметри обраного кластерного об'єму забезпечували як необхідний рівень точності при моделюванні енергетичного стану, так і допустимий обчислювальний час. У якості основного критерію для оцінки було використано значення повної енергії зв'язку E_{tot} у межах кластера (табл. 1).

Таблиця .1 – Повна енергія міжатомної взаємодії в різних системах

системи	E_{tot} (Au)
Co/Al	- 19,017
Co/Fe	- 31,950
Co/Ti	- 38,990
WC/Al	-
WC/Fe	- 16,070
WC/Ti	- 18,760
TiC/Fe	- 18,230
TiC/Ti	- 33,990

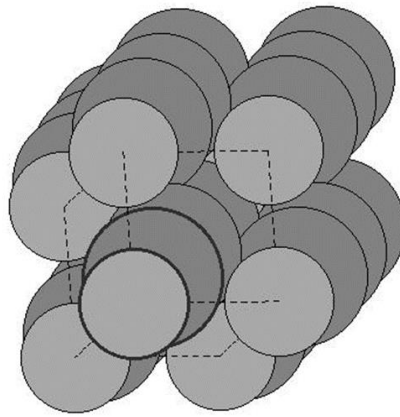


Рис. 7 – Схема модельного кластера для квантово-механічного розрахунку енергії взаємодії у системі WC–Fe

Повна енергія зв'язку кластера (E_{tot}), узятя із протилежним знаком, характеризує енергетичні витрати, необхідні для повного розриву всіх зв'язків між атомами, тобто для повного розпаду кластеру на окремі атоми. Значення питомої енергії зв'язку на один атом визначається як $E_a = E_{tot} / N$, де N – кількість атомів у кластері. Водночас міжатомні відстані прагнуть до значень, притаманних експериментально виявленим параметрам кристалічної решітки. За результатами розрахунків встановлено, що в дослідженні використовувалися кластери, які містили 30 атомів.

Аналізуючи отримані результати (табл. 1), можна стверджувати, що найвищі енергетичні показники демонструють системи Co–Ti, TiC–Ti і Co–Fe. У випадку з WC–Al спостерігалася нестабільність обчислюваних параметрів, що призвело до неможливості отримання узгоджених результатів.

Крім того, на основі вивчення електронної щільності кобальту і карбиду вольфраму встановлено, що рівень Фермі в Co є вищим, ніж у WC. Це пояснює чутливу взаємодію нанопокриттів саме з кобальтовою матрицею, а не з карбідом вольфраму. Отже, зчеплення захисного покриття з основою із твердого сплаву визначається переважно інтенсивністю хімічного зв'язку між атомами покриття й кобальту, що, у свою чергу, залежить від електронної конфігурації елементів. Зокрема, для перехідних металів критичну роль відіграють d- та s-електрони. Висока міцність зв'язків досягається через перекриття відповідних орбіталей, що створює сили тяжіння між ядрами. Саме тому титан виявляється найактивнішим серед цих елементів.

Подальший етап включав обчислення параметрів кристалічної структури, просторової конфігурації, модулів пружності та повної енергії, що припадає на один атом, для зазначених сполук. Результати були співставлені з експериментальними даними. Крім того, оцінювалася ефективність використання графічних процесорів за технологією NVidia CUDA для обчислень — було виявлено підвищення продуктивності розрахунків у 1,5–2 рази.

У процесі врізання зуба фрези в матеріал обробки відбувається ковзання по поверхні з відповідним кутом $\Psi_{ск}$ (рис. 8).

– Якщо α_i значно менше за $K_{сожр}$ (рис. 8), то спостерігається лише пластична деформація без утворення стружки.

– У випадку, коли α_i дорівнює $K_{сожр}$ (рис. 9), відбувається ініціація процесу стружкоутворення та початок формування поверхневого шару.

– При $\alpha_i > K_{сожр}$ (рис. 10) фіксується стабільний процес утворення стружки протягом повного циклу контакту зуба з поверхнею до його виходу з зони взаємодії на куті Ψ_{max} .

Співвідношення між поточним кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і максимальним кутом Ψ_{max} відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективності формування поверхневого шару.

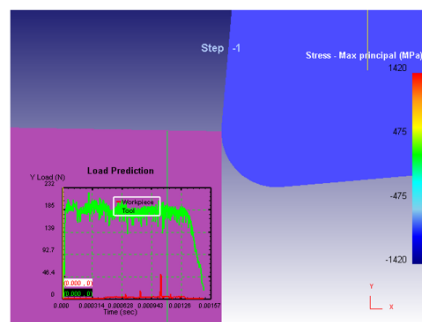


Рис. 8 – Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $\alpha_i \ll K_{сожр}$

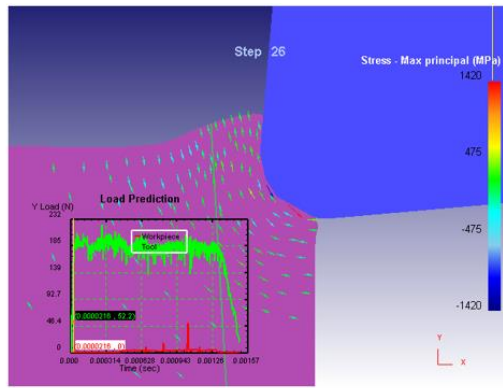


Рис. 9– Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $a_i < K_{сожр}$

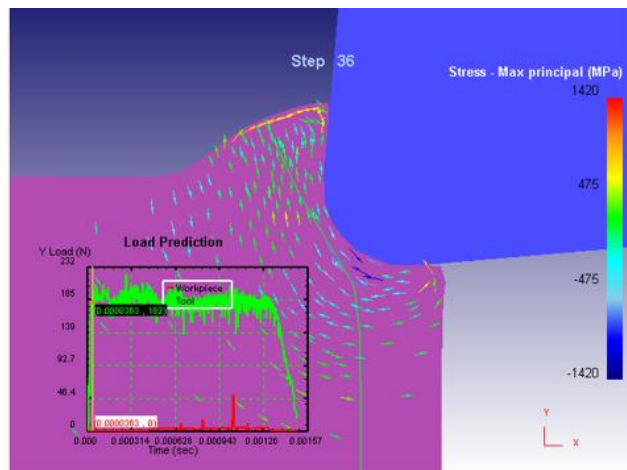


Рис. 10 – Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $a_i = K_{сожр}$

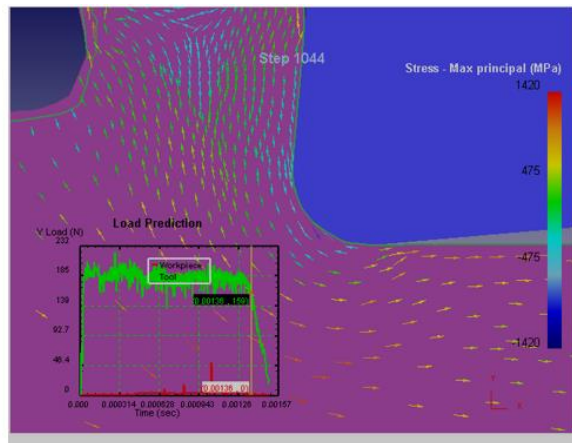


Рис. 11 – Формування поверхневого шару зубооброблюючої фрези при $a_i > K_{сожр}$

З метою передбачення параметрів якості сформованого поверхневого шару була побудована математична модель, яка враховує як технологічні режими та геометричні характеристики процесу, так і фізико-механічні властивості матеріалу. Основою для моделювання слугує перехід пластичного витіснення матеріалу оброблюваної поверхні зубчастого колеса у взаємодії з інтегральним параметром, що описує стан поверхневого шару. Останній виражається через показник шорсткості профілю — параметр Rz.

У роботі проаналізовано технологічні чинники, що впливають на досягнення необхідної якості обробленої поверхні, зокрема — залежність від кута ковзання під час процесу фрезерування зубчастих елементів. У межах дослідження було здійснено як теоретичний аналіз, так і експериментальну перевірку, спрямовані на

встановлення оптимального значення кута ковзання $\Psi_{ск}$, при якому забезпечується стабільний характер процесу різання, досягається необхідна зносостійкість інструменту та гарантується висока якість обробленої поверхні.

При цьому важливим орієнтиром виступає максимальний контактний кут $\Psi_{тах}$, що описує взаємодію зуба фрези з заготовкою. На основі співвідношення між цими кутами було сформовано коефіцієнт ефективності формування поверхневого шару, який дозволяє кількісно оцінити якість результату фрезерування залежно від геометрії та динаміки процесу.

Висновки.

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

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

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

Список літератури

1. Гасанов М.І., Пермяков О.А., Шелковий О.М., Заковортний О.Ю., Клочко О.О. Проблеми відновлення функціональних властивостей експлуатації крупногабаритних зубчастих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1 (7) 2023. – С. 6–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.1(7).01
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemir I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Полонський, Л. Г., Клочко, О. О., Охріменко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, (1(93)), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
7. Гасанов М.І., Заковортний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
8. Гасанов М.І., Клочко А.А., Черкашина Г.І., Перминов Е.І. Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
9. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковортний О.Ю., Перминов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079-004X.
10. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вип. 8. – С. 61–70.
11. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.
12. Клочко А.А., Гасанов М.І., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

13. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезуванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
14. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.

References (transliterated):

- Hasanov M.I., Permyakov O.A., Shelkovyi O.M., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O. Problemy vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei ekspluatatsii krupnolahabarnykh zubchastykh peredach [Problems of restoring functional properties in the operation of large-sized gear drives]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry*, no. 1(7), 2023, pp. 6–15. ISSN 2079-004X. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1\(7\).01](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1(7).01)
- Kovalev V.D., Vasilchenko Y.V., Klochko A.A., Gasanov M.I. Technology of restoration of large gear boxes. In: Dašić, P. (ed.) *Modern Trends in Metalworking*, vol. 1. Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018, pp. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
- Klochko A.A., et al. Tekhnolohichni osnovy zuboobrabotky zakalennykh krupnomodulnykh zubchastykh koles [Technological principles of gear machining of hardened large-module gears]. Kramatorsk: DGMA, 2014. 479 p. ISBN 978-966-379-667-3.
- Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V., Palashek S.Yu., Nevmerzhytskyi A.L. Issledovanie protsessov zubofrezerovaniia zakalennykh shevronnykh zubchastykh koles [Study of gear hobbing processes of hardened helical bevel gears]. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system = Tool Reliability and Optimization of Technological Systems*, no. 40, 2017, pp. 90–101.
- 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.
- Polonskyi L.H., Klochko O.O., Okhrimenko O.A., Betsko Yu.M., Koval B.H., & Khraban D.V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profilu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system [Features of defining tool profile for helical surfaces using CAD systems]. *Tekhnichna Inzheneriia = Technical Engineering*, 1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
- Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. (2024). Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnogo abrazivnogo zubofrezeruvannia tsylindrychnykh zubchastykh koles [Prospects of studying the process of high-speed abrasive gear hobbing of cylindrical gears]. In: *Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti = Modern Issues of Production and Repair in Industry and Transport: Proc. of Int. Sci.-Tech. Seminar*, March 26–27, 2024. Kyiv: ATM Ukraine, pp. 24–25.
- Hasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashyna H.I., Perminov Ye.I. (2018). Hruppoveyе marshrutnye tekhnolohicheskie protsessy vosstanovleniia krupnolahabarnykh zubchastykh koles na osnove imitatsyonnoho modelirovaniia s uchetom prohressiruiushchykh vydov iznosa [Group routing technological processes of restoring large-size gear wheels based on simulation modeling considering progressive wear types]. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system = Tool Reliability and Optimization of Technological Systems*, no. 42, pp. 28–36.
- Hasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Yu., Perminov Ye.V. (2018). Tekhnolohichni rehlement optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velykohabarynykh vidkrytykh zubchastykh peredach [Technological regulations for optimizing systems of restoring functional properties of large open gear drives]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Serii: Tekhnologii v Mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry*, no. 6(1282), pp. 107–112. ISSN 2079-004X.
- Shelkovoii A.N., Klochko A.A., Hasanov M.I. (2017). Obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv zakalennykh zubchastykh koles [Ensuring operational properties of hardened gears]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii = Bulletin of Modern Technologies*, no. 8, pp. 61–70. Sevastopol: FGBOU VO "Sevastopol State University".
- Shelkovyi O.M., Klochko O.O., Hasanov M.I., Kravchenko D.O., Antsyferova O.O. (2017). Funktsionalni aspekty imitatsiinoho matematychnoho modeliuvaniia heometrychnykh parametriv protsesu zubofrezeruvannia [Functional aspects of simulation-based mathematical modeling of gear hobbing process geometry]. *Visnyk NTU "KhPI". Serii: Tekhnologii u Mashynobuduvanni = Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*, no. 26(1248), pp. 66–74. ISSN 2079-004X.
- Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V. (2016). Rehlement vybora i naznacheniiia parametrov sostoianiiia poverkhnostnoho sloia zakalennykh zubchastykh koles [Regulations for selection and assignment of surface layer condition parameters in hardened gears]. *Visnyk NTU "KhPI". Serii: Tekhnologii u Mashynobuduvanni = Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*, no. 33(1205), pp. 145–157. ISSN 2079-004X.
- Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Maiboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S.

(2022). Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuieomoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuVanni zahartovanykh tsylindrychnykh zubchatykh koles na osnovi atomnoho pidkходу [Technological prerequisites for deformation and displacement of the cut layer during high-speed gear hobbing of hardened cylindrical gears based on the atomic approach]. Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v Mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry, no. 1(5), pp. 10–20. ISSN 2079-004X. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.1\(5\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.1(5).02)

14. Ramadani R., Belsak A., Kegl M., Predan J., Pehan S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92–104.

15. Gołębski R., Ivandic Z. (2018). Analysis of modification of spur gear profile. Tehnicki Vjesnik = Technical Gazette, 25(2), 643–648.

Надійшла (received) 17.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Гасанов Магомедємін Ісагомедович (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, ORCID:0000-0002-2161-2386

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

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

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

Ланьо Крістіна Рудольфівна (Lano Kristina) – магістр науковець, кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; тел.: (099) 268 80 24 –e-mail: kristinaxx08.08@gmail.com, ORCID 0009-0005-6271-1099

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

ДОЛЯ В. Е., ЯКОВЕНКО І. Е.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Анотація. У статті представлено аналіз сучасних методів технологічного забезпечення реверс-інжинірингу (зворотного проєктування) відповідальних вузлів газотурбінних установок (ГТУ). Практичним досвідом доведено, що основною перешкодою у відтворенні зношених деталей є подолання «семантичного розриву» між непараметричною 3D-моделлю (геометричною сіткою), отриманою під час високоякісного сканування, та конструкторсько-технологічною документацією, необхідною для підготовки виробництва у САМ-системах. Підкреслено, що для елементів проточної частини ГТУ (компресорів та турбін) важливо не тільки відтворити базову геометрію, але й точно визначити параметри поверхонь, які впливають на аеротермодинаміку вторинних повітряних систем і стійкість до циклічних навантажень. На основі аналізу передових досліджень систематизовано підходи до автоматичного розпізнавання конструктивних елементів (Automatic Feature Recognition, AFR). Особливу увагу приділено новим методам інтеграції основних САД-систем із системами штучного інтелекту, зокрема великими мовними моделями (LLM), за допомогою протоколів Model Context Protocol (MCP) та програмних інтерфейсів (API). Виявлено, що на сучасному етапі цифрової трансформації машинобудування найефективнішим є гібридний підхід. Він поєднує параметричний аналіз 3D-моделей через API САД-систем із семантичною інтерпретацією отриманих даних нейронними мережами. Цей підхід забезпечує оптимальний баланс між точністю, швидкістю та вартістю технологічної підготовки виробництва. Це дозволяє підприємствам, що займаються сервісним обслуговуванням та відновленням відповідальних деталей ГТУ, ефективно автоматизувати процеси проєктування навіть за умов обмежених ресурсів для створення власних спеціалізованих систем машинного навчання.

Ключові слова: реверсивний інжиніринг; газотурбінні установки; технологічне забезпечення; обробка технічної документації; 3D-сканування; MCP-сервери; великі мовні моделі (LLM); САМ-системи.

DOLIA V.E., YAKOVENKO I.E.

ANALYTICAL REVIEW OF TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE REVERSE ENGINEERING OF CRITICAL GAS TURBINE COMPONENTS

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of modern methods for the technological support of reverse engineering applied to critical components of gas turbine engines (GTEs). It is demonstrated that the primary obstacle in the reproduction of worn parts is overcoming the "semantic gap" between the non-parametric 3D model (geometric mesh) acquired through high-fidelity scanning and the design and technological documentation required for manufacturing process planning in CAM systems. The study emphasizes that for GTE flow path elements (compressors and turbines), it is crucial not only to reconstruct the baseline geometry but also to accurately identify surface parameters that affect the aerothermodynamics of secondary air systems and the resistance to cyclic loading. Based on an analysis of cutting-edge research, approaches to Automatic Feature Recognition (AFR) are systematized. Particular attention is given to novel methods of integrating mainstream CAD systems with artificial intelligence, specifically Large Language Models (LLMs), via the Model Context Protocol (MCP) and Application Programming Interfaces (APIs). It is revealed that at the current stage of digital transformation in mechanical engineering, a hybrid approach proves to be the most effective. This approach combines the parametric analysis of 3D models via CAD APIs with the semantic interpretation of the extracted data using neural networks. This methodology ensures an optimal balance between accuracy, speed, and the cost of manufacturing process planning. Consequently, it enables enterprises engaged in the maintenance and restoration of critical GTE components to effectively automate design processes, even under constrained resources for developing proprietary, specialized machine learning systems.

Keywords: reverse engineering; gas turbine engines; technological support; technical documentation processing; 3D scanning; MCP servers; large language models (LLMs); CAM systems.

Вступ

Сучасні інженерні процеси створення газотурбінних установок (ГТУ) починаються з розробки параметричних 3D-моделей у системах автоматизованого проєктування (САПР). Конструкторська та технологічна документація, яка потрібна для подальшого використання в системах САМ, є похідним представленням, що генерується безпосередньо з вихідної САД-моделі. Проте у сфері обслуговування та ремонту ГТУ виникає обернена задача. Оригінальні дані зазвичай відсутні. Вихідною точкою є просторова 3D-модель, отримана шляхом високоточного сканування зношеного або пошкодженого об'єкта (деталі). Наприклад, лопатки чи диска компресора.

Встановити початкову геометрію таких складнопрофільних деталей - завдання підвищеної складності. Особливо після їхньої експлуатації в умовах температурних деформацій та зносу. Основна проблема реверс-інжинірингу (зворотного проєктування) полягає у створенні повноцінної конструкторської документації на основі «німої» полігональної 3D-моделі. Мета цього етапу - забезпечити максимальне автоматичне визначення поверхонь та їхніх параметрів, таких як форма, розміри, допуски та шорсткість.

Практичне вирішення цієї проблеми безпосередньо спирається на алгоритми автоматичного розпізнавання конструктивних елементів (Automatic Feature Recognition, AFR), що забезпечують інтеграцію проєктування і виробництва. Але на шляху до повної автоматизації стоїть концептуальний «семантичний розрив». У САД-системах формоутворювальні елементи виступають зручними абстракціями, такими, як «отвір», «паз» або «замкове з'єднання». Вони добре відображають задум проєктувальника з точки зору геометрії, проте цього недостатньо для САМ-систем та виробництва.

У підготовці виробництва використовуються виробничі елементи, які пов'язані з технологічними операціями, інструментами та послідовностями обробки. Наприклад, один і той же елемент кріплення лопатки може відповідати різним виробничим операціям, таким як фрезерування, шліфування або протягування, залежно від необхідної точності та якості поверхні, які не завжди можна отримати з чисто геометричного скану.

Тому функціонал AFR при реверс-інжинірингу деталей ГТУ має виходити далеко за межі звичайного пошуку патернів у хмарі точок. Дослідники шукають шлях до повноцінного переходу від абстрактної геометрії до мови реального виробництва. Інтелектуальна система повинна розпізнати складну криволінійну поверхню і самостійно згенерувати висновок про метод її відновлення чи виготовлення. А це вимагає глибокої інтерпретації неявної інформації та технічного контексту, що перетворює розпізнавання з геометричного зіставлення на складну задачу, яка включає представлення знань і логічний висновок.

Мета дослідження

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі та систематизації сучасних методологій автоматизованого отримання параметрів конструктивних елементів з 3D-моделей для подолання семантичного розриву при реверс-інжинірингу відповідальних деталей ГТУ.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан метрологічного забезпечення та виявити обмеження класичних систем розпізнавання (AFR) при роботі з полігональними моделями;
- дослідити теоретичні аспекти семантичної невідповідності між геометричними абстракціями САПР та технологічними вимогами САМ-систем;
- оцінити можливість сучасних параметричних CAD-систем щодо надання API-доступу до топологічних даних 3D-моделей;
- проаналізувати ефективність залучення великих мовних моделей (LLM) та протоколів контексту моделі (MCP) для створення гібридних алгоритмів семантичної інтерпретації просторової геометрії;
- здійснити практичну апробацію розробленого гібридного методу на прикладі параметричної оптимізації складнопрофільної інтегральної турбіни.

Аналіз основних досягнень і літератури

Реалізація процесів реверс-інжинірингу відповідальних деталей ГТУ пов'язана з етапом отримання первинних просторових даних (Data Acquisition). Якість, точність та повнота інформації, зібраної на цьому етапі, є фундаментальним базисом для всієї подальшої технологічної підготовки виробництва. Сучасне метрологічне забезпечення реверс-інжинірингу базується на використанні двох основних класів обладнання. Перший - контактні координатні вимірювальні машини (КВМ). Другий - безконтактні 3D-сканери, що працюють на принципах лазерної триангуляції або структурованого світла [1].

Контактні методи гарантують субмікронну точність позиціонування та є безальтернативними при обмірюванні базових призматичних поверхонь, установчих баз та високоточних посадкових отворів. Однак специфіка ГТУ (наприклад, агрегатів класу Solar Centaur 40) полягає у наявності великої кількості складнопрофільних криволінійних поверхонь просторової форми. При оцифруванні аеродинамічних поверхонь роторних лопаток, елементів статорних колодязів (stator-wells) та просторових каналів направляючих апаратів використання КВМ стає надмірно трудомістким, а подекуди - неможливим через геометричну недоступність зон вимірювання [1, 2].

В умовах реального сервісного обслуговування енергетичних та авіаційних установок абсолютна перевага віддається безконтактним системам високоточного 3D-сканування. Ці методи дозволяють генерувати високощільні хмари точок, які згодом шляхом математичної апроксимації перетворюються на суцільні полігональні сітки (як правило, у форматах STL або OBJ). І саме тут дослідники стикаються з фундаментальним технологічним бар'єром. Полігональна модель - це лише дискретне наближення фізичного об'єкта. Отримана сітка може містити мільйони мікротрикутників, які з високою точністю описують зовнішню оболонку деталі, проте з інженерної точки зору така модель є абсолютно «німою» [1]. Вона не має топологічної структури (Boundary Representation, B-Rep), не містить параметричної інформації про радіуси спряжень, осі симетрії, допуски форми та взаємне розташування поверхонь.

Для відповідальних вузлів ГТУ відхилення мікрогеометрії поверхні може призвести до критичних наслідків. Змінився профіль у статорних колодязях? Порушилася геометрія лабіринтних ущільнень? Ці явища викликають паразитні аеротермодинамічні явища. Класичний приклад - в'їддж-нагрів. Це явище пояснюється як, інтенсивне виділення тепла через в'язке тертя повітря у вторинних повітряних системах [3]. Це суттєво знижує загальний термічний ККД компресора та призводить до температурних деформацій диска [3]. Отже, «німа» полігональна сітка не може бути безпосередньо використана для генерації керівних програм у САМ-системах. Відповідно, етап збору геометричних даних є лише початковим кроком реверс-інжинірингу, який зумовлює гостру необхідність розробки методів подальшої глибокої реконструкції та інтелектуальної параметризації отриманих моделей [1].

Сучасні дослідження зосереджуються на гібридних підходах[4]. Науковці намагаються поєднувати переваги різних методів. Наприклад, інтеграція машинного навчання з AutoCAD[5] дозволяє автоматизувати

проектні процеси шляхом аналізу шаблонів проектування та прогнозування наступних дій користувача. Найкращі результати за точністю зараз показують системи, які поєднують аналіз растрових зображень через великі мовні моделі (LLM) із прямим вилученням топології через API-інтерфейси CAD-систем [6].

Незважаючи на значні досягнення, існує кілька невіршених проблем.

По-перше, відсутність стандартів для інтеграції CAD-систем з AI-технологіями ускладнює розробку універсальних рішень.

По-друге, обмежена здатність сучасних LLM до просторової інтуїції створює труднощі при аналізі 3D-геометрії.

По-третє, проблема класифікації поверхонь, встановлення номінальних розмірів та допусків для них залишається актуальною, особливо для складних форм, нестандартних конструктивних елементів та пошкоджених поверхонь [1].

Подальші дослідження потребують розвитку спеціалізованих моделей машинного навчання, навчених на великих наборах даних технічних креслень, а також створення більш ефективних інтерфейсів для інтеграції CAD-систем з AI-компонентами [1]. Особливу увагу слід приділити розробці методів семантичної інтерпретації даних, що дозволить подолати розрив між проєктувальними та виробничими елементами [2].

Теоретичні основи подолання «семантичного розриву» при реконструкції 3D-моделей

Перехід від дискретної полігональної сітки до твердотільної параметричної CAD-моделі є, мабуть, найскладнішим технологічним етапом зворотного проєктування. Зазвичай інженери намагаються автоматизувати цей процес через алгоритми розпізнавання конструктивних елементів (AFR) [2]. Історично класичні підходи AFR базуються на графових методах (пошук топологічних патернів), методах об'ємної декомпозиції (віднімання об'ємів від базового паралелепіпеда) або на системах, що використовують жорсткі логічні правила [7]. Проте практика доводить інше. Для реконструкції зношених деталей ГТУ ці системи демонструють суттєві обмеження та низьку ефективність.

Глибинна сутність проблеми полягає у принциповій відмінності понять конструктивного елемента (feature) на етапах проєктування та технологічної підготовки виробництва. У системах автоматизованого проєктування (CAD) формоутворювальні елементи (form features) являють собою абстракції, зручні для конструктора - «отвір», «ступ», «кишеня», «паз», «фаска» [1]. Вони добре описують виключно геометричну форму і є базовими блоками ідеалізованої 3D-моделі. Натомість для САМ-систем цих геометричних абстракцій критично недостатньо. У контексті підготовки виробництва оперують поняттям виробничих елементів (manufacturing features), які жорстко прив'язані до конкретних технологічних операцій, кінематики верстата, різального інструменту та послідовностей обробки [8].

Саме ця концептуальна розбіжність породжує так звані «семантичний розрив» [1]. Розглянемо класичний приклад. Алгоритм AFR може розпізнати на 3D-скані компресора циліндричну порожнину, класифікувавши її просто як геометричний «отвір». Однак в умовах експлуатації ГТУ ця порожнина може виконувати функцію високоточного посадкового місця під вальницю ковзання, що вимагає операції прецизійного розточування з жорсткими допусками на круглості, або ж бути елементом системи охолодження, де точність не така критична, але важлива якість поверхневого шару [8]. Вибір технологічної операції безпосередньо залежить від потрібної точності та якості поверхні, які неявно приховані у геометрії відсканованої деталі.

Жоден класичний детермінований математичний алгоритм AFR не здатний самостійно розгадати функціональне призначення та технологічні вимоги виключно з аналізу кривини поверхні чи топології полігональної сітки [2]. Завдання суттєво ускладнюється тим, що при реверс-інжинірингу початкова геометрія часто є спотвореною експлуатаційною деградацією - газозною ерозією, термічною повзучістю або механічним зносом.

Отже, семантичний розрив - це алгоритмічна нездатність класичних систем здійснити перехід від «мови геометрії» до «мови виробництва» [1]. Подолання цього розриву перетворює задачу реконструкції зі звичайного геометричного зіставлення на складну проблему семантичної інтерпретації, що безальтернативно зумовлює необхідність залучення методів AI для представлення знань і логічного висновку [9].

Порівняльний аналіз CAD-систем у контексті можливостей API-доступу до топологічних даних

Для подолання описаного семантичного розриву необхідно створити автоматизований канал зв'язку між геометричним ядром САПР та зовнішніми аналітичними алгоритмами. У промисловому реверс-інжинірингу складнопрофільних деталей ГТУ найчастіше використовуються САПР важкого та середнього класів: Siemens NX, CATIA, PTC Creo та SolidWorks. Усі ці системи оснащені спеціалізованими модулями для роботи з хмарами точок (наприклад, ScanTo3D у SolidWorks або Polygon Modeling у NX), які дозволяють виконувати напівавтоматичну апроксимацію полігональної сітки NURBS-поверхнями [10].

Проте функціонал цих вбудованих модулів орієнтований переважно на ручну або інтерактивну роботу інженера-конструктора. Вони не здатні самостійно здійснювати технологічну класифікацію розпізнаних елементів. Відповідно, ключовим критерієм придатності CAD-системи для побудови високоавтоматизованого комплексу ППВ стає не стільки наявність вбудованих AFR-алгоритмів, скільки глибина та відкритість її програмного інтерфейсу застосунків (API) [10].

Програмні інтерфейси (такі як NX Open, CATIA CAA V5 або SolidWorks API) надають можливість зовнішнім скриптам отримувати прямий доступ до математичного ядра САПР. У контексті реверс-інжинірингу API виконує функцію прецизійного екстрактора просторових даних. Наприклад, після первинної сегментації відсканованої моделі компресора Solar Centaur 40, спеціалізований макрос через API може миттєво обчислити та експортувати у структурованому вигляді (наприклад, у форматі JSON) масив критичних параметрів: площі поверхонь, вектори нормалей, головні радіуси кривини, координати центрів мас окремих сегментів та граф суміжності граней (B-Rep топологію) [10].

Важливо зазначити, що хоча API CAD-систем забезпечує абсолютну математичну точність (до сьомого знаку після коми), експортовані дані залишаються семантично нейтральними. API може передати зовнішній програмі інформацію про те, що дві циліндричні поверхні є коаксіальними, а їхні діаметри становлять 120,05 мм та 120,15 мм відповідно. Однак математичне ядро CAD не здатне зробити логічний висновок, що цей перепад діаметрів утворює лабиринтне ущільнення вторинної повітряної системи ГТУ, яке критично впливає на ввідідж-нагрів [3].

Для обґрунтування вибору базової САПР при побудові інтелектуальних систем ТПВ, було проведено порівняльний API провідних CAD-систем. Основні критерії оцінки включали основне призначення системи, здатність роботи з фасетними моделями, глибину доступу до B-Rep топології та зручність інтеграції з алгоритмами AI (табл. 1).

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз можливостей API сучасних CAD-систем у контексті інтелектуального реверс-інжинірингу

Характеристика	Siemens NX	CATIA V5/V6	SolidWorks	FreeCAD
Призначення	Важкий параметричний 3D-САПР для складного машинобудування та енергетичної галузі	3D-САПР важкого класу для авіабудування та автомобільної промисловості	Параметричне 3D-моделювання для машинобудування	Відкритий САПР з акцентом на ядро OpenCASCADE
Основні інструменти API	NX Open (C++, C#, Python)	CAA V5 (C++), VBScript	SolidWorks API (C#, VB.NET, C++)	Python API
Доступ до параметрів полігональної сітки (Mesh)	Високий. Прямий доступ до вершин та фасетів через модуль Polygon Modeling	Середній. Робота з хмарами точок вимагає спеціалізованих ліцензійних модулів (DSE)	Обмежений. Слабкі вбудовані методи прямої роботи з сітками без модуля ScanTo3D	Високий. Повний доступ до модуля Mesh Part на рівні вихідного коду
Екстракція B-Rep топології	Максимальний. Повний доступ до математичного ядра Parasolid	Високий. Доступ до точних геометричних параметрів поверхонь	Високий. Простий та добре документований доступ до радіусів, площин і нормалей	Середній. Ядро OpenCASCADE дає базовий функціонал екстракції
Рівень складності інтеграції з хмарними LLM	Середній. Наявність нативної підтримки Python значно спрощує розробку	Високий. Закрита екосистема вимагає складних модулів на C++ для експорту JSON	Середній. Вимагає використання C#.NET для формування HTTP-запитів до AI	Низький (Найлегший). Ідеальна сумісність з Python-бібліотеками для нейромереж

Аналіз даних, наведених у таблиці 1, свідчить про те, що для підприємств, які займаються реверс-інжинірингом відповідальних деталей ГТУ, оптимальним вибором є системи з відкритою архітектурою (наприклад, Siemens NX або FreeCAD) завдяки нативній підтримці мови Python, яка є стандартом де-факто у сфері AI. Системи середнього класу (SolidWorks) потребують розробки спеціалізованих проміжних модулів для ефективного трансляції топологічних даних до зовнішніх AI-агентів [11].

Інтелектуалізація процесу розпізнавання: застосування великих мовних моделей (LLM)

Оскільки детерміновані алгоритми CAD-систем не володіють здатністю до технологічної рефлексії, парадигма сучасного реверс-інжинірингу зміщується в бік використання систем AI для здійснення семантичної інтерпретації просторової геометрії. Серед різноманітних архітектур машинного навчання особливу перспективність для машинобудівної галузі демонструють великі мовні моделі (LLM), такі як останні покоління Gemini, Qwen або спеціалізовані відкриті моделі [11].

Історично LLM розроблялися для обробки природної мови (NLP), проте їхня здатність виявляти складні приховані закономірності у величезних масивах багатовимірних даних робить їх унікальними інструментами для подолання семантичного розриву. Навчаючись на колосальних обсягах технічної документації, патентів, стандартів (ISO, ASME, ДСТУ) та наукових публікацій, сучасні LLM формують глибоке внутрішнє представлення інженерних знань. Вони оперують конструктивними принципами побудови машин: наприклад, здатні ідентифікувати, що для кріплення робочих лопаток на диску турбіни найчастіше використовується замкове з'єднання типу «ялинка», яке має специфічні геометричні пропорції та концентратори напружень [1].

У запропонованій концепції інтелектуального реверс-інжинірингу LLM не працює безпосередньо з візуальним зображенням полігональної сітки, оскільки комп'ютерний зір часто схильний до метричних похибок та «галюцинацій» у визначенні точних розмірів. Натомість, мовна модель отримує на вхід строго

структурований текстовий масив топологічних даних (координати, вектори, радіуси), попередньо вилучений через API CAD-системи. Завдання LLM полягає у семантичній класифікації цих даних. Проаналізувавши граф суміжності граней та їх просторову орієнтацію, нейромережа здатна класифікувати абстрактну комбінацію площин та радіусів на відсканованому роторі як «компенсаційний паз», «місце під балансувальний тягарець» або «канал охолодження лопатки» [11].

Крім ідентифікації виробничого елемента LLM здатна генерувати рекомендації щодо технологічних параметрів, які фізично неможливо «побачити» на зношеній деталі. Наприклад, розпізнавши посадкове місце під підшипник, AI звертається до власної бази знань стандартів і пропонує оптимальні значення шорсткості поверхні (Ra) та допусків форми для даного діаметра та типу посадки.

Для наочної демонстрації переваг запропонованої інтелектуалізації процесу, у таблиці 2 наведено порівняльний аналіз можливостей традиційних систем AFR та гібридного підходу з використанням великих мовних моделей при виконанні реверс-інжинірингу

Таблиця 2 - Порівняльна характеристика методів розпізнавання конструктивних елементів при реверс-інжинірингу деталей ГТУ

Критерій порівняння	Класичні детерміновані алгоритми AFR	Гібридний підхід з використанням AI (LLM)
Тип розпізнаваного елемента	Формоутворювальний (Form feature) - суто геометрична абстракція.	Виробничий (Manufacturing feature) - технологічно орієнтований елемент.
Здатність до контекстуального аналізу	Відсутня. Алгоритм оцінює лише локальну кривину та топологію граней.	Висока. Аналізується загальний інженерний контекст деталі (ротор, статор, ущільнення).
Стійкість до експлуатаційних дефектів (знос, ерозія)	Вкрай низька. Відхилення від ідеальної математичної форми призводить до критичного збою розпізнавання.	Висока. Нейромережа здатна ігнорувати шуми та логічно екстраполювати пошкоджені ділянки бази.
Ступінь залежності від програмування	Потребує жорсткого кодування (Hardcoding) сотень математичних правил та IF/THEN умов.	Використовує гнучкі семантичні запити (Prompts) та аналіз структурованих JSON-даних.
Генерація технологічних параметрів (шорсткість, допуски)	Неможлива. Базується виключно на наявній (відсканованій) геометрії.	Можлива. Використовується закладена база знань міжнародних машинобудівних стандартів.

Основаючись на дані з таблиці 2, можна зробити висновок, що впровадження мовних моделей дозволяє здійснити якісний стрибок у технологічній підготовці виробництва. Якщо класичні алгоритми лише констатують наявність геометричної форми, то LLM здійснює її комплексну інженерну експертизу, виступаючи в ролі «інтелектуального агента», який заповнює прогалини втраченої оригінальної документації.

Інтеграція CAD та AI: використання MCP-серверів як технологічного моста

Практична реалізація гібридного підходу в умовах реального виробництва стикається з фундаментальним комунікаційним бар'єром. Більшість комерційних САПР (проаналізованих у попередньому розділі) мають закриту архітектуру, яка не передбачає наявності стандартизованих каналів зв'язку із зовнішніми хмарними AI-агентами [12]. Вирішенням цієї інтеграційної проблеми є впровадження MCP[13], які у рамках інженерних задач можуть бути адаптовані як багатоконтекстні протоколи для обробки багатовимірних даних. MCP-сервери виконують функцію універсального семантичного транслятора між графічним інтерфейсом інженера-конструктора та API великої мовної моделі.

У контексті технологічної підготовки виробництва відповідальних деталей ГТУ розроблена авторами концептуальна архітектура інтелектуального технологічного забезпечення на базі MCP-серверів наведена на рис. 1.



Рисунок 1. Концептуальна архітектура інтелектуального технологічного забезпечення реверс-інжинірингу деталей ГТУ на базі MCP-серверів

Відповідно до запропонованої архітектури (рис. 1), процес реверс-інжинірингу концептуально поділяється на три взаємопов'язані макро-блоки. **Блок 1 (Збір даних реверс-інжинірингу та CAD-системи)** відповідає за первинний збір даних. На цьому етапі за допомогою оптичних або лазерних 3D-сканерів (Модуль збору даних) генерується непараметрична полігональна модель пошкодженої деталі (наприклад, лопатки компресора або турбіни). Після завантаження цієї сітки в базу САПР (Catia / NX / FreeCAD), система за допомогою внутрішнього API виконує базову екстракцію математичних параметрів кривини (Дані аналізу кривини) та виділяє контури поверхонь (Екстракція елементів поверхні) [1]. Проте, як було доведено раніше, на цьому етапі модель все ще залишається семантично «німою».

Критичним вузлом інтеграції виступає **Блок 2 (Проміжне ПЗ для семантичної інтеграції на базі MCP)**, ядром якого є розгорнутий MCP-сервер. Головна функція цього модуля - маршрутизація та перетворення «сирих» геометричних даних у зрозумілий для AI формат. Модуль нормалізації даних (Data Normalization Unit) структурує отримані від САПР координати та вектори. Далі оптимізатор семантичного контексту (Semantic Context Optimizer) збагачує ці дані специфічною інформацією з бази знань ГТУ (Конектор бази знань ГТУ) - наприклад, вказуючи, що деталь є елементом ротора високого тиску. Фактично, MCP-сервер формує спеціалізований інженерний запит (GTE-Prompt) та через транслятор API для інженерних запитів відправляє його до хмарної нейромережі [14].

Отримавши структурований запит, **Блок 3 (Інженерія на базі ШІ та керування життєвим циклом)**, що базується на потужностях зовнішніх LLM та інженерних баз даних, виконує глибокий семантичний аналіз. Інтелектуальний AI-агент не лише класифікує геометричні елементи, але й здатен ініціювати паралельні інженерні розрахунки. Як показано на схемі, система аналізує відхилення профілю лопатки (Deviation Analysis), перевіряє неперервність реконструйованих NURBS-поверхонь (Перевірка неприривності G1/G2) та може взаємодіяти з CAE-модулями для оцінки напружено-деформованого стану та структурної цілісності [11]. Після завершення аналізу, MCP-сервер ретранслює оброблені, технологічно обґрунтовані дані (Результати та оптимізація) назад у CAD-систему для автоматичної генерації параметричної моделі, повністю готової для CAM-системи.

Практичне застосування гібридних алгоритмів: від полігональної сітки до САМ-моделі

Практичне застосування описаних гібридних алгоритмів обробки просторових даних, що базуються на синергії параметричних САПР та генеративного штучного інтелекту, докорінно змінює класичну парадигму зворотного проектування. Традиційний підхід, який вимагав від інженера-конструктора десятків годин ручної праці для перетворення фасетної хмари точок на параметризовану технологічну модель, на практиці замінюється автоматизованим конвеєром семантичного обміну даними [15].

Основна практична перевага розробленого гібридного підходу полягає у забезпеченні оптимального балансу між математичною точністю, швидкістю обробки та економічною доцільністю. Математичне ядро CAD-системи гарантує прецизійну точність вимірювань. Нейромережам об'єктивно бракує цієї точності під час прямого аналізу полігональних масивів через схильність до «галюцинацій». Натомість LLM забезпечує інженерну та технологічну осмисленість розпізнаних елементів (якої бракує детермінованим алгоритмам AFR) [2].

З економічної точки зору, практичне використання стандартизованих MCP-серверів, як сполучної ланки між локальними САПР та існуючими потужними нейромережами загального призначення (такими як Gemini, Qwen або LLaMA), відкриває нові можливості для підприємств малого та середнього бізнесу. Компанії, що займаються ремонтом та обслуговуванням газотурбінних установок, отримують змогу уникати колосальних фінансових і часових витрат на розробку, навчання та підтримку власних локальних систем комп'ютерного зору

з нуля [1]. Інтеграція через MCP робить передові AI технології доступними в якості хмарних сервісів, які легко масштабуються під конкретні виробничі завдання.

Отже, впровадження запропонованого гібридного методу у реальне виробництво гарантує, що відновлена 3D-модель міститиме не просто ідеальну математичну копію зношеної геометрії деталі, але й відновлені технологічні параметри (установчі бази, допуски форми та розташування, параметри шорсткості). Це дозволяє суттєво скоротити цикл технологічної підготовки виробництва та забезпечити розробку безпечних, ефективних і безпомилкових керуючих програм для верстатів з ЧПК.

Висновки

У результаті проведеного комплексного аналітичного огляду методологій технологічного забезпечення реверс-інжинірингу відповідальних деталей ГТУ можна зробити такі висновки:

- 1. Ідентифікація головного технологічного бар'єра.** Доведено, що критичною перешкодою у циклі відтворення складнопрофільних деталей ГТУ - це зовсім не метрична точність 3D-сканування, а «семантичний розрив» між непараметричною полігональною моделлю та конструкторсько-технологічною документацією. Традиційні AFR алгоритми виявилися неефективними для ідентифікації технологічного призначення зношених криволінійних поверхонь, оскільки вони оперують суто геометричними абстракціями, а не виробничими елементами.
- 2. Обґрунтування архітектури гібридного підходу.** Сьогоднішній етап цифрової трансформації машинобудування вимагає гібридних рішень. Саме вони демонструють найвищу ефективність. Суть методу полягає у розподілі функцій: математичне ядро CAD-систем (через API) забезпечує прецизійну екстракцію топологічних даних, а LLM здійснюють їх комплексну семантичну інтерпретацію на основі бази знань машинобудівних стандартів.
- 3. Роль інтеграційних технологій (MCP).** Використання MCP дозволяє усунути проблему закритої архітектури комерційних САПР. MCP-сервери виступають ефективним технологічним мостом, який стандартизує обмін просторовими даними між графічним інтерфейсом інженера та зовнішніми хмарними AI-агентами, автоматизуючи процес генерації параметричних технологічних моделей.
- 4. Практична та економічна значущість.** Запропонована методологія інтелектуального технологічного забезпечення дозволяє сервісним підприємствам значно скоротити час підготовки виробництва керуючих програм для верстатів з ЧПК та створення базових моделей для адитивного виробництва. Використання стандартизованих протоколів інтеграції із загальнодоступними LLM усуває необхідність колосальних інвестицій у розробку локальних неймереж, роблячи передові технології реверс-інжинірингу доступними для малого та середнього бізнесу енергетичного та авіаційного секторів.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що поточний стан розвитку цифрових технологій дозволяє успішно впроваджувати частково автоматизовані рішення для екстракції та обробки даних про поверхні з непараметричних 3D-моделей деталей. Хоча абсолютно повна автоматизація без участі інженера ще не досягнута, вже зараз можна забезпечити значне підвищення продуктивності завдяки делегуванню рутинних завдань із семантичної класифікації та визначення параметрів системам штучного інтелекту. Майбутнє розвитку галузі беззаперечно лежить у площині глибокої інтеграції CAD-систем, AI-технологій та спеціалізованих API, що створюватимуть єдине інтелектуальне середовище для інженерної діяльності. Для невеликих компаній, які займаються відновленням та ремонтом відповідальних деталей машин малими серіями, найбільш раціональним та економічно виправданим є використання гібридного підходу, який спирається на інтеграцію з існуючими хмарними LLM без необхідності навчання власних локальних неймереж.

Список використаної літератури / Bibliography

1. Сотниченко В. В., Яковенко І. Е. Комплексний аналіз методологій автоматичного встановлення параметрів конструктивних елементів з 3D моделей при зворотному проектуванні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків, 2025.
2. Shi Y., Zhang Y., Xia K. A Critical Review of Feature Recognition Techniques in CAD/CAM Integration. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31, № 5. P. 1025–1042.
3. Turner A. B., Long C. A., Childs P. R. N., Hills N. J., Millward J. A. A review of some current problems in gas turbine secondary systems. *ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. Orlando, Florida, 1997. Paper 97-GT-325. P. 1–8.
4. Wang P., Weichao L., et al. A hybrid framework for manufacturing feature recognition from CAD models of 3-axis milling parts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2023. Vol. 80. P. 102472.
5. Maheshwari S., Agrawal M. Harnessing AutoCAD designs with machine learning for smart building optimization. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2024. Vol. 35, № 3. P. 412–428.
6. Trovato M., Fera M., Macchiaroli R. Machine learning in design for additive manufacturing: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2025. Vol. 74. P. 1–15.
7. Khan M. T., Feng W., Chen L., Zhang S., Li Y. Automatic Feature Recognition and Dimensional Attributes Extraction from CAD Models for Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 72. P. 45–58.
8. Яковенко І. Е., Пермяков О. А. Технологічна оснастка. Розрахунки. Проектування: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. 232 с.
9. Rapp M., Amrouch H., Lin Y., Yu B. MLCAD: A Survey of Research in Machine Learning for CAD. *ACM Computing Surveys*. 2021.

Vol. 54, № 8. P. 1–36.

10. Sofias K., Vairis A., Vaxevanidis N. Implementing CAD API Automated Processes in Manufacturing Environments. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 14. P. 7692.
11. Kumar S., Kapoor S., Vardhan H., Zhao Y. Generative AI for CAD Automation: Leveraging Large Language Models for 3D Modelling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 132, № 7-8. P. 3457–3472.
12. Hou X., Zhao Y., Wang S., Wang H. Model Context Protocol (MCP): Landscape, Security Implications. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 12345–12358.
13. Model Context Protocol (MCP) Specification. 2024. URL: <https://modelcontextprotocol.io/specification>.
14. Fei X., Zheng X., Feng H. MCP-Zero: Proactive Toolchain Construction for LLM Agents from Scratch. *Proceedings of the IEEE Conference on Artificial Intelligence*. 2024. P. 112–125.
15. Portela A. HBIM for Archaeological Documentation: Integrating AI Tools via MCP Servers. *Emona Journal of Archaeological Computing*. 2025. Vol. 12, № 1. P. 78–95.

Налійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Доля Владислав Євгенович (Dolia Vladyslav) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Vladyslav.Dolia@mit.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0007-7822-5225.

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Ihor.E.Yakovenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8344-996X.

В. А. ДЕРБАБА, В. А. КОЗЕНКО, О. О. БОГДАНОВ, В. І. КОЗЕНКО, С. В. АЛЕКСЄЄНКО

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ ЗАСОБІВ ОБРОБІТКУ ГРУНТУ

У статті розглянуто можливості застосування адитивних технологій у процесі проектування та вдосконалення засобів обробітку ґрунту на прикладі перспективного лісового культиватора, призначеного для експлуатації в умовах нерозкорчованих вирубок. Наведено класифікацію обладнання для 3D-друку за рівнем його доступності та функціонального призначення, що охоплює споживчий, персональний, професійний і виробничий класи, а також виконано порівняльний аналіз сучасних систем 3D-друку за вартістю з орієнтацією на умови європейського ринку. Показано, що персональні 3D-принтери за своїми технічними характеристиками та економічними показниками є доцільною альтернативою дорогим професійним установкам для використання в освітніх і науково-дослідних закладах.

У межах дослідження розроблено тривимірну твердотільну модель лісового культиватора в середовищі CAD-системи SolidWorks та здійснено її підготовку до адитивного виготовлення в програмному забезпеченні Simplify3D. Описано послідовність технологічних операцій, що включає орієнтацію деталей у робочому об'ємі принтера, масштабування, налаштування параметрів друку, генерацію підтримок і формування керувального G-коду. Запропоновано підхід до поділу вихідної цифрової моделі на окремі функціональні вузли з урахуванням обмежень робочої камери 3D-принтера, особливостей спряження елементів і необхідності забезпечення рухомості основних вузлів макета. У результаті проведено адитивне виготовлення масштабованої моделі культиватора в масштабі 1:20 із використанням екструзійної технології друку. Отриманий макет відтворює конструктивну будову, просторове компонування та взаємне розташування основних вузлів машини, зберігаючи рухомість секцій робочих органів, елементів підвіски й запобіжних механізмів. Показано, що наявність функціональних рухомих з'єднань дає змогу імітувати реальні робочі рухи знаряддя, аналізувати його кінематику, траєкторії переміщення робочих органів, характер взаємодії вузлів між собою, а також оцінювати вплив різних варіантів компонування на функціональні параметри конструкції.

Окрему увагу приділено аналізу двох основних варіантів компонування культиватора, призначених для суцільного обробітку міжрядь лісових культур і для доглядів методом осідлання рядка. Наведено їх конструктивні особливості, параметри розміщення секцій робочих органів і ширини оброблюваних смуг, а також обґрунтовано універсальність запропонованої модульної схеми. Результати імітаційних досліджень свідчать про здатність культиватора надійно долати перешкоди у вигляді пнів заввишки до 38 см за глибини обробітку 12 см, що підтверджує доцільність використання такої конструкції в умовах нерозкорчованих вирубок. Показано, що застосування 3D-макетування на ранніх етапах проєктування дає змогу виявляти конструктивні недоліки та нераціональні компонувальні рішення ще до виготовлення повнорозмірного дослідного зразка, істотно скорочуючи часові й матеріальні витрати на доведення конструкції. Обґрунтовано можливість використання масштабованого фізичного макета не лише як демонстраційного засобу, а й як функціонального експериментального стенда для верифікації результатів імітаційного моделювання, уточнення параметрів математичних і кінематичних моделей та підвищення достовірності прогнозування роботи культиватора.

Відзначено освітній і мотиваційний потенціал адитивних технологій, які дозволяють інтегрувати сучасні CAD/CAM-рішення в навчальний процес, підвищити наочність інженерних дисциплін і залучити студентів до активної науково-дослідної та винахідницької діяльності. У цілому результати дослідження підтверджують перспективність використання технологій 3D-друку як інструменту візуалізації, інженерного аналізу та оптимізації конструктивних рішень у галузі проектування засобів обробітку ґрунту, зокрема для лісогосподарських машин, орієнтованих на застосування в межах еколого-ресурсозберігаючих технологій.

Ключові слова: 3D-друк, адитивні технології, ґрунтообробні машини, лісовий культиватор, прототипування, CAD-моделювання, Simplify3D, екструзійний друк, компонування, кінематика.

V. DERBABA, V. KOZENKO, O. BOHDANOV, V. KOZENKO, S. ALEKSIEIENKO

USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF SOIL TILLAGE EQUIPMENT

The article considers the possibilities of applying additive technologies in the process of designing and improving soil tillage equipment using the example of a promising forest cultivator intended for operation under conditions of ungrubbed clear-cut areas. A classification of 3D printing equipment by accessibility level and functional purpose is presented, covering consumer, personal, professional, and industrial classes. A comparative analysis of modern 3D printing systems in terms of cost is carried out with reference to the European market conditions. It is shown that personal 3D printers, in terms of their technical characteristics and economic indicators, represent a feasible alternative to expensive professional systems for use in educational and research institutions.

Within the framework of the study, a three-dimensional solid model of a forest cultivator was developed in the SolidWorks CAD environment and prepared for additive manufacturing using the Simplify3D software. The sequence of technological operations is described, including part orientation within the printer's build volume, scaling, print parameter setup, support generation, and G-code creation. An approach to dividing the original digital model into separate functional units is proposed, taking into account the limitations of the printer's build chamber, the mating features of elements, and the need to ensure the mobility of the main assemblies of the scale model.

As a result, a scaled cultivator model at a 1:20 scale was additively manufactured using extrusion-based printing technology. The obtained mock-up reproduces the structural design, spatial layout, and mutual arrangement of the main machine components while maintaining the mobility of the working tool sections, suspension elements, and safety mechanisms. It is shown that the presence of functional movable joints makes it possible to simulate real working motions of the implement, analyze its kinematics, the trajectories of working tool movements, the interaction between individual units, and assess the influence of different layout configurations on the functional parameters of the design. Special attention is paid to the analysis of two main cultivator layout variants intended for continuous inter-row tillage of forest plantations and for row-straddling maintenance operations. Their design features, parameters of working tool section placement, and widths of the processed strips are presented, and the versatility of the proposed modular scheme is substantiated. The results of simulation studies indicate the cultivator's ability to reliably overcome obstacles in the form of stumps up to 38 cm high at a tillage depth of 12 cm, which confirms the feasibility of using such a design under conditions of ungrubbed clear-cut areas.

It is shown that the application of 3D mock-up prototyping at early design stages makes it possible to identify design shortcomings and irrational layout solutions before manufacturing a full-scale prototype, significantly reducing time and material costs for further refinement of the design. The possibility of using the scaled physical model not only as a demonstration tool but also as a functional experimental test bench for verifying simulation results, refining the parameters of mathematical and kinematic models, and increasing the reliability of performance prediction for the cultivator is substantiated.

The educational and motivational potential of additive technologies is also highlighted, as they enable the integration of modern CAD/CAM solutions into the educational process, enhance the visual clarity of engineering disciplines, and involve students in active research and inventive activities.

Overall, the results of the study confirm the prospects of using 3D printing technologies as a tool for visualization, engineering analysis, and optimization of design solutions in the field of soil tillage equipment design, particularly for forestry machinery intended for application within environmentally friendly and resource-saving technologies.

Keywords: 3D printing, additive technologies, soil tillage machinery, forest cultivator, prototyping, CAD modeling, Simplify3D, extrusion printing, layout design, kinematics.

Вступ. З моменту появи перших комп'ютерів людина невпинно прагнула подолати межу між реальним і віртуальним світом, перетворивши цифрові об'єкти на фізичну реальність. Можливість швидкого та точного перенесення моделі з тривимірного комп'ютерного середовища в відчутний тривимірний об'єкт ще донедавна здавалася нездійсненною мрією інженерів, дизайнерів, архітекторів та представників багатьох інших професій. Однак розвиток адитивних технологій дозволив суттєво наблизитися до практичної реалізації цієї ідеї. Саме таким технологіям і присвячена дана стаття.

Нині одним із найшвидших, найдоступніших і найефективніших способів «матеріалізації» 3D-моделей є 3D-друк. Він дає змогу в стислі строки отримувати фізичні прототипи, функціональні деталі та навіть готові вироби на основі цифрових даних. Для наочнішого уявлення можливостей сучасних адитивних установок доцільно здійснити класифікацію 3D-принтерів за рівнем їх доступності та функціонального призначення (рис. 1).

Аналіз основних досягнень та літератури. Споживчий клас охоплює принтери, призначені насамперед для особистого використання в домашніх умовах або в освітніх цілях. Ці пристрої проєктуються з орієнтацією на невідготовленого користувача та, як правило, оснащуються інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, автоматизованими системами калібрування й спрощеними налаштуваннями друку. У більшості випадків такі принтери працюють з найпоширенішими термопластами, передусім ABS і PLA, що робить їх експлуатацію відносно недорогою та безпечною. Основними сферами їх застосування є хобі-проекти, навчальні завдання, а також виготовлення простих прототипів і декоративних елементів.



Рис. 1 – Класифікація 3D-принтерів

Персональний клас становить прикордонну категорію між побутовими та промисловими рішеннями. Ці принтери за форм-фактором і зручністю експлуатації багато в чому подібні до споживчих моделей, однак вирізняються вищою якістю складання, удосконаленою кінематикою, стабільністю роботи та підвищеною точністю друку. Завдяки цьому вони знаходять застосування в малому бізнесі, дизайнерських студіях та інженерних бюро для виготовлення складніших прототипів і дрібносерійних виробів. За своїми характеристиками персональні принтери значною мірою наближаються до молодшого сегмента професійних систем.

Професійний клас об'єднує установки, у яких реалізовані найсучасніші досягнення в галузі адитивних технологій. Такі принтери характеризуються високою точністю позиціонування, стабільністю параметрів друку, розширеним набором підтримуваних матеріалів і розвиненим програмним забезпеченням. Сфера їх застосування надзвичайно широка та охоплює як швидке прототипування, так і виготовлення функціональних деталей для машинобудування, медицини, електроніки й інших галузей. Професійні системи часто

використовуються в наукових дослідженнях і дослідно-конструкторських роботах, де висувуються підвищені вимоги до відтворюваності результатів і якості поверхні виробів.

Виробничий клас охоплює великогабаритні та високоавтоматизовані установки, призначені для промислового застосування. Ці машини поєднують у собі точність і якість, характерні для професійних принтерів, із збільшеною областю друку, високою продуктивністю та розвиненим рівнем автоматизації технологічного процесу. На таких установках можливе виготовлення не лише прототипів, а й готових споживчих виробів, придатних для безпосереднього використання або подальшого складання. Виробничі 3D-принтери дедалі частіше інтегруються в реальні виробничі лінії, що дозволяє розглядати їх як повноцінну альтернативу традиційним методам формоутворення в низці галузей [3].

Водночас створення прототипів є лише початковим етапом використання адитивних технологій. Наступною стадією виступає швидке виробництво готових виробів. Уже сьогодні системи 3D-друку дають змогу отримувати функціональні деталі з різних матеріалів, включно з пластиками, композитами та металами, що суттєво розширює сферу їх практичного застосування. Такий підхід є особливо доцільним для одиничного та дрібносерійного виробництва, оскільки з'являється можливість у відносно короткі терміни освоювати широкий асортимент продукції без значних витрат на виготовлення прес-форм, штампів або складного технологічного оснащення.

На сучасному етапі системи 3D-друку набули широкого поширення в багатьох галузях. Вони активно використовуються в дизайні та архітектурі для створення макетів і концептуальних моделей, у сфері освіти як наочний інструмент для навчання інженерним і технічним дисциплінам, в одиничному та дрібносерійному виробництві для виготовлення дослідних і експериментальних зразків, у медицині для створення анатомічних моделей, імплантів і хірургічних шаблонів, у функціональному тестуванні, ювелірній справі, виробництві сувенірної продукції, стоматології та низці інших напрямів. Така універсальність зумовлює стрімке зростання популярності адитивних технологій у наукових і промислових колах.

За принципом роботи сучасні 3D-принтери умовно поділяють на кілька основних класів, кожен з яких ґрунтується на власній технологічній концепції формування виробу шляхом пошарового нарощування матеріалу. Саме ці класи визначають характерні особливості обладнання, типи використовуваних матеріалів, точність друку та сфери практичного застосування, що зумовлює доцільність їх подальшого детального розгляду.

Лазерні 3D-моделювальні пристрої належать до класу адитивних установок, у яких формування виробу здійснюється за рахунок локального впливу лазерного випромінювання на вихідний матеріал. У процесі роботи такого принтера на робочу платформу пошарово наноситься тонкий шар рідкого фотополімеру, здатного до швидкого тверднення під дією світла певної довжини хвилі. Після нанесення кожного шару поверхня матеріалу селективно опромінюється лазерним променем саме в тих зонах, де відповідно до цифрової моделі має сформуватися контур майбутнього виробу. Під впливом лазерного випромінювання фотополімер переходить із рідкого стану в твердий, утворюючи міцний і геометрично точний фрагмент конструкції.

Цей цикл пошарового нанесення фотополімеру та його лазерного тверднення багаторазово повторюється до завершення формування останнього шару. Після цього отриманий тривимірний об'єкт вилучається з ванни з рідким фотополімером і, як правило, піддається додатковій післяобробці, що може включати промивання в розчиннику, ультрафіолетове доотверднення та механічне очищення поверхні від залишків смоли. Лазерні фотополімерні 3D-принтери (технологія SLA) вирізняються високою точністю друку, можливістю відтворення дрібних деталей і гладкою поверхнею виробів, що робить їх особливо затребуваними в ювелірній справі, стоматології, медицині, мікроінженерії та під час виготовлення високоточних прототипів.

Окрім фотополімерних систем, існують лазерні 3D-принтери, у яких як вихідний матеріал використовується металевий або полімерний порошок. У таких установках (технології SLS, SLM, DMLS) на робочу платформу також пошарово наноситься тонкий шар порошку, який потім селективно спікається або плавиться лазерним променем відповідно до заданої геометрії моделі. Під дією високої температури частинки порошку зв'язуються між собою, утворюючи тверду структуру. Після завершення друку надлишковий незв'язаний порошок видаляється, а готовий виріб може додатково оброблятися термічно або механічно для підвищення міцності та точності розмірів. Такі лазерні системи широко застосовуються в машинобудуванні, авіакосмічній промисловості та медицині для виготовлення функціональних деталей із металів і високоміцних полімерів.

Струминні 3D-принтери належать до класу адитивних установок, у яких процес формування виробу за своєю конструктивною схемою багато в чому нагадує роботу традиційного струминного принтера. Ключова відмінність полягає в тому, що замість нанесення чорнил на пласку поверхню використовується механізм пошарового розподілу порошкоподібного або рідкого матеріалу, здатного до подальшого тверднення чи полімеризації. Формування об'єкта відбувається шляхом послідовного нанесення тонких шарів вихідного матеріалу на робочу платформу з подальшим локальним зміцненням у строго визначених зонах.

Після створення кожного шару струминна друкувальна головка подає полімеризувальну добавку, зв'язувальну речовину або інший активатор тверднення саме на тих ділянках, де матеріал має затвердіти й утворити контури майбутнього виробу. У результаті в межах одного шару формується тверда структура, тоді як навколишній матеріал залишається в пухкому або неполімеризованому стані та виконує функцію природної

підтримки для наступних шарів. Такий цикл пошарового нанесення матеріалу та його селективного тверднення багаторазово повторюється до повного завершення формування тривимірного об'єкта всередині об'єму неполімеризованого порошкоподібного середовища.

Як витратні матеріали в струминних 3D-принтерах часто застосовуються гіпсові, полімерні або композитні порошки, а також спеціальні зв'язувальні склади. Одним із поширених варіантів є використання гіпсу, який твердне під час контакту зі звичайними водними чорнилами або спеціально підібраними водними розчинами, що подаються через друкувальну голівку. Такий підхід дає змогу отримувати моделі з відносно високою точністю геометрії та гладкою поверхнею, що робить струминні 3D-принтери затребуваними в архітектурному макетуванні, дизайні, ювелірній справі та під час виготовлення наочних демонстраційних зразків.

До переваг струминної технології належать висока швидкість друку, можливість одночасного формування складних внутрішніх порожнин без використання додаткових підтримок, а також відносна простота післяобробки виробів. Водночас такі принтери зазвичай забезпечують меншу механічну міцність готових деталей порівняно з методами лазерного спікання або екструзійного друку, що обмежує сферу їх застосування переважно прототипуванням і візуальним моделюванням, а не функціональним виробництвом.

3D-принтери, що працюють за принципом екструзії пластику, належать до найпоширенішого та найдоступнішого класу адитивних установок. У таких пристроях вихідний полімерний матеріал у вигляді нитки (філаменту) подається в екструдер, де він нагрівається до температури плавлення та переходить у в'язкотекучий стан. Після цього розплав полімеру пошарово наноситься на робочу платформу у формі безперервного струменя діаметром від кількох десятків міліметра до кількох міліметрів, залежно від діаметра сопла та заданих параметрів друку.

Формування виробу здійснюється за рахунок послідовного накладання тонких шарів матеріалу, які, злипаючись і дифундуючи між собою в розплавленому стані, утворюють монолітну структуру. Кожен новий шар наноситься поверх попереднього відповідно до геометрії цифрової 3D-моделі, що дає змогу відтворювати як прості, так і досить складні просторові форми. У міру охолодження й тверднення полімеру сформовані шари набувають необхідної механічної міцності та стабільності розмірів.

Рух екструдера в процесі друку керується трикоординатною кінематичною системою, подібною за принципом дії до систем, що застосовуються на гравірувально-фрезерних верстатах із числовим програмним керуванням. Така система забезпечує точне позиціонування друкувальної голівки по осях X, Y і Z, що визначає геометричну точність і відтворюваність отриманих виробів. Як витратні матеріали в екструзійних 3D-принтерах найчастіше використовуються термопласти PLA, ABS, PETG, Nylon та їх композити, що робить цю технологію універсальною для прототипування, навчання й виготовлення функціональних деталей в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва [3, 5].

Проведемо детальний ціновий аналіз сучасних систем 3D-друку (рис. 2), який дає змогу оцінити їх доступність для науково-дослідних установ, освітніх закладів і малих інженерних колективів. На сьогодні спостерігається суттєвий розрив між персональними та професійними 3D-принтерами за рівнем їх вартості, що істотно впливає на можливості їх упровадження в навчальний і дослідницький процес. Так, середня ціна персональних 3D-принтерів на європейському ринку коливається в межах 1 200–2 000 євро залежно від бренду, технічних характеристик, об'єму робочої камери та підтримуваних матеріалів. Водночас навіть бюджетні моделі професійних 3D-принтерів мають вартість, що починається орієнтовно від 7 000–10 000 євро, а для установок середнього та високого класу може сягати 20 000–50 000 євро і більше.

Такий ціновий дисбаланс зумовлює істотні обмеження для малих дослідницьких лабораторій, університетських кафедр і технікумів, бюджет яких не дозволяє здійснювати великі капітальні вкладення в дорогі адитивні системи. Унаслідок цього придбання професійного 3D-принтера часто стає серйозним фінансовим тягарем, що потребує залучення грантових коштів або спеціальних програм фінансування. Водночас персональні 3D-принтери за умови грамотного налаштування та вибору оптимальних режимів друку здатні забезпечити цілком прийнятну якість виготовлення моделей із термопластичних матеріалів, достатню для цілей прототипування, навчальних експериментів і попереднього аналізу конструктивних рішень. Саме це робить їх особливо привабливими для освітніх і науково-дослідних цілей, де важливими є не лише технічні параметри, а й економічна доцільність упровадження технології [4].

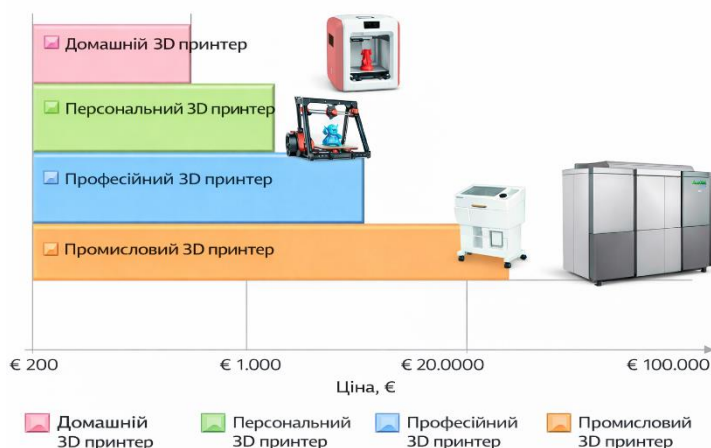


Рис. 2 – Порівняння цінних категорій 3D-принтерів

Мета дослідження, постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку машинобудування, зокрема в галузі проектування ґрунтообробної та лісогосподарської техніки, характеризуються зростанням вимог до скорочення термінів розроблення нових виробів, зниження матеріальних витрат на виготовлення дослідних зразків і підвищення точності інженерних рішень на ранніх етапах проектування. Традиційні методи створення повнорозмірних макетів і прототипів ґрунтообробних знарядь потребують значних фінансових ресурсів, тривалого виробничого циклу та залучення спеціалізованого обладнання, що істотно обмежує можливості оперативного внесення змін у конструкцію й ускладнює відпрацювання альтернативних компоувальних рішень.

Особливої актуальності ця проблема набуває під час розроблення нових типів лісових культиваторів, призначених для роботи в умовах нерозкорчованих вирубок, де конструкція знаряддя повинна поєднувати високу прохідність, надійність, адаптивність до складного рельєфу та мінімальний антропогенний вплив на ґрунтовий покрив. У таких умовах помилки в компоуванні робочих органів, недосконалість кінематичних схем або нераціональні конструктивні рішення можуть призводити до суттєвого зниження ефективності роботи машини, збільшення навантажень на окремі вузли та зростання експлуатаційних витрат.

Водночас розвиток адитивних технологій і доступність персональних 3D-принтерів відкривають нові можливості для створення масштабних фізичних макетів складних машин і механізмів, які можуть використовуватися як інструмент візуалізації, попереднього інженерного аналізу та експериментального відпрацювання конструктивних рішень. Проте методичні підходи до інтеграції 3D-макетування в процес проектування ґрунтообробних знарядь, зокрема лісових культиваторів, на сьогодні залишаються недостатньо опрацьованими, а практичні приклади системного використання таких технологій у навчально-науковому середовищі мають поодинокий характер.

У зв'язку з цим виникає науково-прикладна проблема, що полягає в обґрунтуванні доцільності застосування адитивних технологій для створення масштабних макетів ґрунтообробних машин, розробленні раціональної методики їх проектування та виготовлення, а також оцінюванні можливостей використання таких макетів для аналізу кінематики, компоування і функціональних характеристик перспективних конструкцій.

Метою даного дослідження є обґрунтування ефективності використання технологій 3D-друку в процесі проектування засобів обробки ґрунту на прикладі лісового культиватора, розроблення та виготовлення його масштабної фізичної моделі, а також оцінювання можливостей застосування отриманого макета для візуалізації конструктивних рішень, аналізу кінематики робочих органів і оптимізації схем їх компоування. Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких основних завдань: розроблення тривимірної CAD-моделі культиватора; підготовку її до адитивного виготовлення; створення масштабного макета з використанням екструзійної технології 3D-друку; аналіз конструктивних і кінематичних можливостей отриманої моделі; а також оцінювання перспектив інтеграції 3D-макетування в навчальний і науково-дослідний процес.

Матеріали дослідження. Виходячи з наведених міркувань, у Вищій школі комунікації та управління в Познані (Польща) було ухвалено рішення про придбання 3D-принтера екструдерного типу Ultimaker S3, який зарекомендував себе на європейському ринку як надійний і технологічно зрілий пристрій з оптимальним співвідношенням «ціна – якість». Даний принтер вирізняється стабільною кінематикою, високою точністю позиціонування, підтримкою широкого спектра термопластів і розвиненим програмним забезпеченням, що робить його придатним для використання в навчальних лабораторіях і дослідницьких центрах. Його придбання дозволило суттєво розширити матеріально-технічну базу закладу та інтегрувати адитивні технології в освітній процес і наукові дослідження.

Зазначений 3D-принтер було використано для створення макета 3D-моделі перспективного лісового культиватора (рис. 3), призначеного для застосування в межах еколого-ресурсозберігаючих технологій, що

виключають корчування пнів і спрямовані на мінімізацію антропогенного впливу на лісові екосистеми [1, 2]. Використання адитивних технологій у даному випадку дало змогу в стислі строки отримати наочний і функціонально повноцінний макет, придатний для детального аналізу компоувальних рішень, оцінювання взаємного розташування елементів і перевірки кінематики робочих органів культиватора. Це, у свою чергу, дозволило виявити потенційні конструктивні недоліки ще на етапі проектування та скоригувати окремі вузли без значних додаткових витрат.

Розглянемо детальніше конструкцію культиватора, реалізовану в цифровій моделі та відтворену у вигляді 3D-макета. Культиватор складається зі зчпного пристрою 1, рами 2, що включає основну раму 3 і верхню раму 4, з'єднані між собою чотирма стійками 5, кронштейна кріплення робочого органа 6, запобіжного механізму 7, розміщеного в корпусі 8, стійки в зборі зі ступицею 9 та сферичних дисків 10. Така модульна структура забезпечує не лише достатню жорсткість конструкції, а й гнучкість у формуванні різних варіантів компоування робочих органів залежно від виконуваної технологічної операції.

Особливістю даної конструкції є можливість реалізації кількох конфігурацій розміщення робочих органів, що дозволяє адаптувати культиватор до різних умов експлуатації, типів ґрунту та технологічних завдань. Зокрема, зміна положення сферичних дисків і налаштування параметрів їх взаємного розташування дає змогу регулювати глибину обробітку, інтенсивність руйнування ґрунтової кірки та характер формування борозен. Це підвищує універсальність машини й розширює можливості її застосування в лісгосподарських роботах, орієнтованих на відновлення вирубок без попереднього корчування пнів.

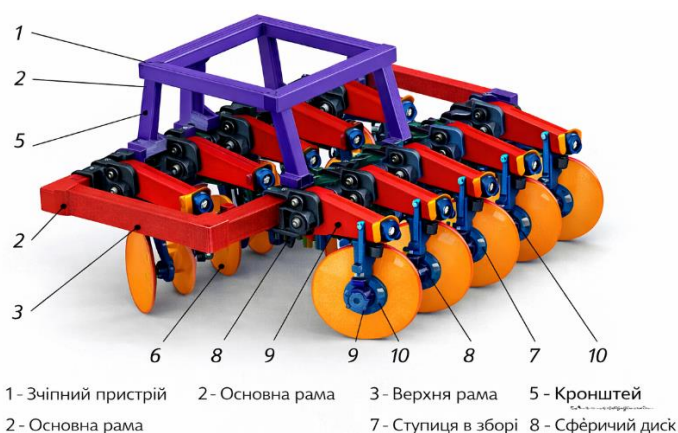


Рис. 3 – Макет культиватора виготовлений на принтері Ultimaker S3

У цілому результати проведеного аналізу та практичної апробації адитивних технологій свідчать про доцільність використання персональних 3D-принтерів у науково-дослідній і освітній діяльності як економічно обґрунтованої альтернативи дорогим професійним системам. Вони забезпечують достатній рівень точності й відтворюваності для завдань інженерного проектування, дають змогу значно скоротити терміни розробки дослідних зразків і сприяють формуванню сучасного технологічного середовища в закладах вищої освіти та дослідницьких центрах.

Перший варіант компоування культиватора орієнтований на виконання суцільного обробітку міжрядь лісових культур і призначений для ефективного пригнічення небажаної трав'янистої рослинності, а також неодерев'янілої порослі деревно-чагарникових видів. Така технологічна схема обробітку дає змогу істотно зменшити конкурентний вплив бур'янів на культурні насадження та створити більш сприятливі умови для їх росту й розвитку. У цій конфігурації на передньому брусі знаряддя встановлюються шість лівообертальних секцій, розміщених із міждисловою відстанню 280 мм між різальними крайками. Аналогічна кількість правообертальних секцій монтується на задньому брусі таким чином, щоб зони їх впливу перекривали одна одну й формували суцільну смугу обробітку. Таке розташування робочих органів забезпечує рівномірне розпушування ґрунту та підрізання рослинності по всій ширині захвату, виключаючи утворення необроблених ділянок. Загальна ширина оброблюваної смуги за цієї компоувки становить 2,7 м, що дає змогу використовувати культиватор для догляду за значними за площею лісокультурними ділянками з високою продуктивністю.

Другий варіант компоування культиватора розроблений для проведення доглядів методом «осідлання рядка» культур і спрямований на пригнічення рослинності в безпосередній близькості до культурних рослин за одночасного збереження захисної зони навколо них. Такий режим роботи є особливо актуальним на ранніх стадіях розвитку лісових культур, коли існує підвищений ризик їх механічного пошкодження. У цій конфігурації на передньому брусі знаряддя розміщуються по дві ліво- і правообертальні секції, встановлені за схемою «всвал» із міждисловою відстанню 280 мм між різальними крайками сусідніх дисків. При цьому формується центральна захисна зона шириною 600–700 мм, у межах якої відсутній вплив робочих органів. На задньому брусі встановлюються три ліво- і правообертальні секції, змонтовані за схемою «врозвал» на такій

самій міждисконній відстані та з центральною захисною зоною шириною 400–500 мм. Така компоновка дає змогу більш гнучко формувати профіль оброблюваної поверхні та адаптувати інтенсивність впливу на ґрунт залежно від положення відносно рядка культур. У результаті з обох боків рядка обробляються смуги шириною по 800 мм кожна, що забезпечує ефективне пригнічення бур'янів за збереження цілісності кореневої системи культурних рослин.

Проведені імітаційні дослідження на основі тривимірних твердотільних моделей показали, що прийнята конструктивна схема культиватора має високу прохідність і стійкість до динамічних навантажень, які виникають під час наїзду на перешкоди. Зокрема встановлено, що конструкція запобіжних механізмів і несучої рами забезпечує надійне подолання ґрунту заввишки до 38 см за глибини обробітку ґрунту 12 см без руйнування елементів конструкції та без суттєвого відхилення робочих органів від заданої траєкторії руху. Це свідчить про достатню адаптивність культиватора до експлуатації в умовах нерозкорчованих вирубок і ділянок із високою неоднорідністю рельєфу та ґрунтового покриття.

Конструктивні особливості культиватора дають змогу використовувати його як для суцільного обробітку міжрядь лісових культур, так і для виконання доглядів методом осідлання рядка, що істотно розширює спектр його технологічного застосування. Універсальність машини досягається за рахунок модульного принципу компонування робочих органів, за якого окремі секції можуть демонтуватися й встановлюватися в різних комбінаціях залежно від конкретних умов роботи та поставлених агротехнічних завдань.

Переналадження культиватора зводиться виключно до операцій зі зняття та переустановлення секцій робочих органів у потрібну конфігурацію. Ці операції не потребують значних часових витрат і можуть виконуватися безпосередньо в польових умовах без залучення спеціалізованого обладнання або складного інструменту. Така технологічна простота обслуговування істотно знижує простоту техніки, підвищує коефіцієнт її використання та полегшує експлуатацію в межах сезонних лісогосподарських робіт.

У цілому реалізована конструктивно-технологічна концепція культиватора забезпечує поєднання високої функціональної гнучкості, надійності та експлуатаційної зручності. Це дає змогу розглядати його як перспективний засіб механізації доглядових робіт у лісових культурах, орієнтований на застосування в умовах еколого-ресурсозберігаючих технологій і мінімізації антропогенного впливу на ґрунтовий покрив.

Таким чином, для наочної демонстрації можливостей, закладених у конструкцію культиватора, створений макет має володіти здатністю імітації реального робочого процесу та всіх операцій з перекомпонування робочих органів, передбачених різними варіантами його компонування. Це, своєю чергою, потребує забезпечення не лише прийнятних міцнісних характеристик елементів конструкції, а й рухомості основних вузлів, що дає змогу відтворювати кінематику роботи знаряддя в умовах, наближених до експлуатаційних. Реалізація цих вимог можлива за рахунок раціонального конструктивного поділу вихідної тривимірної моделі на простіші й технологічніші елементи, зручні для адитивного виготовлення, подальшого складання та багаторазового демонтажу.

У розглянутому випадку друк макета здійснювався не у вигляді єдиного монолітного виробу, а у вигляді окремих вузлів, які були виокремлені ще на стадії проєктування з урахуванням їх функціонального призначення, габаритних обмежень робочої камери 3D-принтера, а також особливостей спряження та взаємного переміщення елементів. Такий підхід дозволив не лише спростити процес друку, а й забезпечити модульність конструкції макета, що є особливо важливим для демонстрації різних схем компонування робочих органів і проведення навчальних або дослідницьких експериментів.

Для виконання друку кожен із вузлів завантажувався в керувальну програму Simplify3D у форматі STL (рис. 4, а). На цьому етапі виконувалися операції з їх орієнтації в робочому об'ємі принтера, масштабування до заданого масштабу, а також налаштування ключових технологічних параметрів друку, зокрема висоти шару, швидкості екструзії, температури сопла й підігріваного стола, щільності заповнення та товщини зовнішніх стінок. Додатково проводилася оптимізація положення деталей з метою мінімізації об'єму підтримок, зниження ймовірності деформацій і поліпшення якості формування відповідальних геометричних елементів.

На наступному етапі програмне забезпечення автоматично генерувало керувальне завдання для 3D-принтера, що включало траєкторії руху екструдера, режими роботи обладнання, параметри пошарового формування та алгоритми розстановки підтримок у зонах із нависаючими елементами й складною просторовою геометрією (рис. 4, б). Сформований G-код дозволяв точно відтворити задану форму деталей, забезпечуючи стабільність процесу друку та відтворюваність результатів під час виготовлення однотипних елементів. Використання функції попереднього перегляду траєкторій у Simplify3D дало змогу на етапі підготовки завдання виявити потенційні дефекти друку, зокрема недостатню підтримку звисів, надмірну концентрацію матеріалу у вузьких зонах або ризик колізії сопла з уже сформованими елементами, і своєчасно скоригувати параметри процесу.

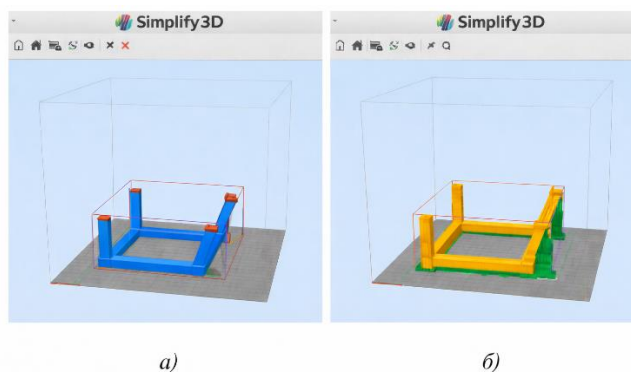


Рис. 4. – Частина моделі, завантажена в програму Simplify3D:
а – після масштабування 1:20; б – після генерації завдання з розстановкою підтримок

Після завершення адитивного виготовлення надруковані елементи за потреби піддавалися післяобробці, що включала видалення підтримок, механічне зачищення поверхонь у місцях контакту з опорами, локальну підгонку спряжених площин і отворів, а також контроль геометричних розмірів із використанням вимірювального інструменту. Ці операції дозволяли забезпечити необхідну точність складання та плавність переміщення рухомих вузлів без заїдань і перекосів.

Заключним етапом було ручне складання окремих вузлів у єдиний макет культиватора, у ході якого перевірялася рухомість основних елементів, точність посадок, співвісність обертових деталей і відповідність загальної геометрії складання проектній 3D-моделі. Додатково проводилася імітація робочих рухів культиватора, зокрема поворот секцій робочих органів, їх взаємне перекриття та зміна компонування відповідно до різних технологічних схем обробітку. Такий поетапний і технологічно вивірений підхід дозволив отримати функціонально наочний, конструктивно коректний і багаторазово трансформований макет, придатний для демонстрації принципу роботи культиватора, оцінювання його компонувальних рішень і використання в навчальних та науково-дослідних цілях.

На рис. 5 подано остаточний варіант моделі культиватора в масштабі 1:20, виготовлений із використанням технології адитивного виробництва на 3D-принтері. Отриманий макет є матеріальним втіленням розробленої тривимірної твердотільної моделі та значною мірою відтворює конструктивну будову, просторове компонування і взаємне розташування всіх основних вузлів культиватора. У процесі проєктування та подальшого виготовлення особливу увагу було приділено збереженню геометричних пропорцій, відносних розмірів елементів і характерних особливостей конструкції, що дало змогу забезпечити адекватність масштабної моделі реальному прототипу.

При цьому в макеті збережено рухомість усіх ключових елементів, зокрема секцій робочих органів, стійок, елементів кріплення дисків, вузлів підвіски та запобіжних механізмів. Таке конструктивне рішення забезпечує можливість імітації реальних робочих рухів і кінематики знаряддя, а також дає змогу відтворювати взаємодію окремих вузлів між собою за різних варіантів компонування. Завдяки цьому модель може використовуватися не лише як демонстраційний зразок, а й як функціональний експериментальний стенд для аналізу роботи механізму в умовах, наближених до експлуатаційних.



Рис. 5 – Фізичний макет, виготовлений методом 3D-друк

Наявність рухомих з'єднань і функціональних вузлів дає можливість наочно продемонструвати основні кінематичні характеристики культиватора, зокрема амплітуду й траєкторію переміщення робочих органів, висоту їх підйому під час наїзду на перешкоди, а також характер роботи запобіжних механізмів за дії зовнішніх навантажень. Це дозволяє візуально оцінити, яким чином відбувається перерозподіл зусиль у конструкції, які

елементи є найбільш навантаженими та як змінюється положення робочих органів залежно від профілю поверхні й умов обробітку ґрунту.

Використання масштабованого макета також надає широкі можливості для експериментального відпрацювання компоувальних рішень без необхідності виготовлення повнорозмірного дослідного зразка. Зокрема, на основі цієї моделі може здійснюватися оптимізація схем розміщення робочих органів на рамі, оцінювання ступеня їх перекриття в поперечному напрямку, перевірка зазорів між елементами конструкції, а також аналіз потенційних зон контакту й взаємних перешкод під час роботи в складних умовах, наприклад у разі наїзду на пні, каміння або інші перешкоди. Це дає змогу виявляти конструктивні недоліки на ранній стадії проєктування та вносити коригування в цифрову модель з мінімальними часовими й матеріальними витратами.

Крім того, виготовлена модель у масштабі 1:20 має значний навчально-методичний потенціал. Вона може використовуватися в освітньому процесі для наочної демонстрації принципів роботи ґрунтообробних знарядь, особливостей їх конструктивної схеми, а також переваг модульного компоування робочих органів. Така форма візуалізації істотно полегшує сприйняття складних інженерних рішень студентами та слухачами, підвищує якість навчання і сприяє формуванню практичних навичок аналізу конструкцій сільськогосподарських і лісгосподарських машин.

Таким чином, виготовлена модель культиватора в масштабі 1:20 є не просто зменшеною копією проєктованого знаряддя, а багатофункціональним дослідницьким і демонстраційним інструментом. Вона сприяє підвищенню ефективності проєктування, оптимізації конструктивних і компоувальних рішень, обґрунтуванню параметрів перспективного лісового культиватора та зниженню ризиків, пов'язаних із переходом від віртуальної моделі до повнорозмірного дослідного зразка.

Висновки. Таким чином, на підставі проведеного аналізу та практичної апробації адитивних технологій можна сформулювати такі узагальнювальні висновки. Використання макетів ґрунтообробних знарядь, виготовлених із застосуванням 3D-принтерів, дає змогу не лише наочно відтворити тривимірну цифрову модель у вигляді фізичного об'єкта, а й істотно розширює можливості інженерного аналізу на ранніх стадіях проєктування. Фізична візуалізація конструкції полегшує сприйняття просторового компоування, взаємного розташування вузлів і характерних особливостей механізму, що, своєю чергою, сприяє більш ефективному обговоренню та просуванню інженерних ідей у середовищі конструкторів, дослідників і потенційних замовників.

Окрім демонстраційної функції, масштабні 3D-макети створюють передумови для проведення прикладних досліджень кінематики та компоування виробу. Наявність рухомих елементів дає змогу аналізувати траєкторії переміщення робочих органів, характер їх взаємодії між собою, а також оцінювати вплив різних варіантів компоування на функціональні параметри знаряддя. Такий підхід робить можливим виявлення конструктивних недоліків і нераціональних рішень ще до виготовлення повнорозмірного дослідного зразка, що знижує часові й матеріальні витрати на наступні етапи проєктування та доведення конструкції.

Додатковою перевагою застосування 3D-макетування є його висока адаптивність і модульність. У разі потреби зміни окремих елементів конструкції або схеми їх розміщення коригування можуть бути оперативно внесені в цифрову модель із подальшим повторним виготовленням відповідних вузлів. Це забезпечує гнучкість проєктного процесу та дає змогу порівняно швидко тестувати альтернативні компоувальні рішення без суттєвих фінансових вкладень.

Слід також відзначити значний освітній і мотиваційний потенціал такого підходу. В умовах закладів освіти використання 3D-друкованих макетів дозволяє істотно підвищити наочність навчального матеріалу, зробити процес вивчення машин і механізмів більш інтерактивним і практикоорієнтованим. Участь студентів у розробці цифрових моделей, підготовці їх до друку, післяобробці та складанні макетів сприяє формуванню в них системного інженерного мислення, розвитку навичок роботи із сучасними CAD/CAM-технологіями та адитивним обладнанням, а також залученню до активної науково-дослідної й винахідницької діяльності.

У цілому застосування 3D-принтерів для створення макетів ґрунтообробних знарядь може розглядатися як перспективний і методично обґрунтований інструмент, що поєднує в собі функції візуалізації, інженерного аналізу та освітньої підтримки. Такий підхід сприяє прискоренню інноваційних процесів, підвищенню якості конструкторських рішень і формуванню сучасного технологічного мислення у майбутніх фахівців у галузі сільськогосподарського та лісгосподарського машинобудування.

Список літератури

1. Serhii Alekseyenko, Vladyslav Ruban, Vitalii Derbaba, Oleksandr Bohdanov & Serhii Patsera (2025). Justification of Digital Algorithmic Model Controlling the Radial Runout of Gear Wheels. 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2025) (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering; Publisher: Springer Nature). p181-191. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16
2. Проців В.В. Сучасні полімерні матеріали та технології в 3D-прінтингу / В.В. Проців, В.А. Козечко, В.А. Дербаба, О.О. Богданов// Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2021 – № 65 – С.107-117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>

3. Kozechko, V., Kozechko, V., Yakubenko, Y., Kozechko, V., & Bohdanov, O. (2025). Efficiency of comprehensive chemico-thermal treatment for hardening high-speed steel R6M5. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(2), 335–343. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.335-343>
4. Shapoval, O., Kozechko, V., Savchenko, I., Kozechko, V., Shelkovska, I. (2025). Mathematical Modeling of Microstructure Evolution in the Process of Hot Rolling of Strips and Sheets. In: Aikin, M., et al. *Advanced and Novel Technologies — Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM 2025. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20
5. O. Voichyshen, S. Patsera, V. Derbaba & O. Bohdanov. (2024). Virtual Device for Assessing the Reliability of Control of Geometric Parameters of Mechanical Product Depending on the Accuracy of the Tool. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering; Publisher: Springer Nature)*. p.409-421 https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35

References (transliterated)

1. Alekseyenko, S., Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Patsera, S. (2025). Justification of digital algorithmic model controlling the radial runout of gear wheels. In *Proceedings of the 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2025)* (Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 181–191). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16)
2. Protsiv V.V. Suchasni polimerni materialy ta tekhnolohii v 3D-printynhu / V.V. Protsiv, V.A. Kozechko, V.A. Derbaba, O.O. Bohdanov // Zbirnyk naukovykh prats NHU. – D.: Derzhavnyiyschyi navchalnyi zaklad «Natsionalnyi hirnychiy universytet» 2021 – No. 65 – S. 107–117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>
3. Kozechko, V., Kozechko, V., Yakubenko, Y., Kozechko, V., & Bohdanov, O. (2025). Efficiency of comprehensive chemico-thermal treatment for hardening high-speed steel R6M5. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(2), 335–343. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.335-343>
4. Shapoval, O., Kozechko, V., Savchenko, I., Kozechko, V., & Shelkovska, I. (2025). Mathematical modeling of microstructure evolution in the process of hot rolling of strips and sheets. In Aikin, M., et al. (Eds.), *Advanced and Novel Technologies — Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM 2025* (Advances in Science, Technology & Innovation). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20](https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20)
5. Voichyshen, O., Patsera, S., Derbaba, V., & Bohdanov, O. (2024). Virtual device for assessing the reliability of control of geometric parameters of a mechanical product depending on the accuracy of the tool. In *Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 409–421). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35)

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дербабa Віталій Анатолійович (Derbaba Vitalii) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0002-3918-2177, derbaba.v.a@nmu.one

Козечко Вікторія Анатоліївна (Kozechko Viktoriia) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0002-2837-187X, kozechkova@ukr.net

Богданов Олександр Олександрович (Bohdanov Olexsandr) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0003-4790-2338, bohdanov.o.o@nmu.one

Козечко Валентин Іванович (Kozechko Valentyn) – PhD, доцент Вища школа комунікації та управління, Познань, Польща, ORCID ID – 0000-0003-2370-1603, valont1975@gmail.com

Алексєнко Сергій Вікторович (Alekseyenko Sergey) – д.т.н., професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0003-0320-989X, alexeyenko_sv@ukr.net

СТАРЧЕНКО В.В., КАМЧАТНАЯ-СТЕПАНОВА К.В., ГЛАВЧЕВА Ю.М., ВОЛОШКІНА І.В., КЛОЧКО Л.В., ВОЛОШКІН М.Д.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОСТАБІЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ КРУПНОГАБАРИНИХ СТАНИН ВАЖКОГО ВЕРСТАТОБУДУВАННЯ

У статті розглянуто вдосконалення процесу інтегрованих технологій забезпечення точності виготовлення станин важких верстатів з застосуванням передових технологій вібростабілізації на різних резонансних частотах перед виконанням проміжних та фінішних операцій шліфування станин важких верстатів. Проведено аналіз кінематичних, механічних та теплових характеристик процесу з забезпеченням стабілізації внутрішніх напружень. Обґрунтовано умови оптимального шліфування чи лезової обробки, що дозволяють підвищити точність та якість поверхневого шару. Характеристики загартованих станин важких верстатів прямо залежить від параметрів поверхневого шару конструкторських, технологічних баз та внутрішніх напружень, які проявляються через деякий час негативним чином, як відхилення параметрів точності, деформації, утворення мікро та макротрещин на поверхні, які руйнують станини.

Ключові слова: інтегровані технології, внутрішні напруження, вібростабілізація на різних резонансних частотах, станини важких верстатів, точність та якість поверхневого шару, деформації, утворення мікро та макротрещин, руйнування станини.

STARICHENKO V., KAMCHATNAYA-STEPANOVA K., GLAVCHEVA Y., VOLOSHKINA I., KLOCHKO L., VOLOSHKIN M.

INTEGRATED VIBRATION STABILIZATION TECHNOLOGY TO ENSURE THE ACCURACY OF MANUFACTURING OF LARGE-SIZED MACHINERY BEDS

The article considers the improvement of the process of integrated technologies for ensuring the accuracy of manufacturing heavy machine tool beds using advanced vibration stabilization technologies at different resonant frequencies before performing intermediate and finishing operations. grinding heavy machine tool beds. An analysis of the kinematic, mechanical and thermal characteristics of the process with the stabilization of internal stresses is carried out. The conditions of optimal grinding or blade processing are substantiated, which allow to increase the accuracy and quality of the surface layer. The characteristics of hardened heavy machine tool beds directly depend on the parameters of the surface layer of the design, technological bases and internal stresses, which manifest themselves after some time in a negative way, as deviations from accuracy parameters, deformations, the formation of micro and macro cracks on the surface that destroy the beds.

Keywords: integrated technologies, internal stresses, vibration stabilization at different resonant frequencies, heavy machine tool beds, accuracy and quality of the surface layer, deformations, the formation of micro and macro cracks, bed destruction.

Вступ. Одним із найважливіших завдань сучасного машинобудування є розвиток таких стратегічних галузей, як важке верстатобудування, приладобудування. Розвиток цих галузей залежить від забезпечення підприємств високотехнологічним обладнанням, що потребує високої точності виготовлення. Важке верстатобудування, як базова галузь, зосереджена в регіонах з розвинутою науково-дослідною та виробничою інфраструктурою. Підвищення точності та продуктивності важких верстатів є актуальною науково-технічною проблемою, яка має істотний вплив на якість кінцевої продукції. За рахунок вдосконалення процесу інтегрованих технологій забезпечується точність виготовлення станин важких верстатів підвищеної ступені точності з застосуванням передових технологій вібростабілізації на різних резонансних частотах перед виконанням проміжних та фінішних операцій шліфування станин важких верстатів. Основні завдання, що стоять перед машинобудуванням є підвищення ефективності виробництва, його інтенсифікація та поліпшення якості продукції.

З плином часу через перерозподіл і релаксацію внутрішніх залишкових напружень, викликаних технологічними процесами при виготовленні (лиття, зварювання, механічна обробка тощо), втрачається стабільність геометричних розмірів деталей. У процесі релаксації напружень пружні деформації переходять у пластичні, внаслідок чого величини залишкових напружень знижуються. Нерівномірність протікання в металі цього процесу порушує рівноважний стан, викликаючи пружну деформацію деталі зі зміною її геометричної форми. Підвищення стабільності геометричних розмірів досягається переважно за рахунок зниження внутрішніх залишкових напружень і мікропластичних деформацій в матеріалі деталі.

Для забезпечення розмірної стабільності деталей в машинобудуванні найчастіше використовуються традиційні технологічні процеси — низькотемпературний відпал і природне старіння, вкрай недостатньо впроваджується вібраційна обробка деталей. В останні роки у зв'язку з розробкою і впровадженням нового сучасного віброобладнання (віброкомплекси), що дозволяє виконувати вібростабілізуючу обробку деталей, виявилася висока ефективність цього методу обробки деталей і конструкцій. Вібростабілізуюча обробка в багатьох випадках заміняє дорогу термічну обробку, що вимагає великих енергетичних витрат, та забруднює навколишнє середовище. Важливість і актуальність вирішення проблеми стабільності геометричних розмірів виробів на основі новітніх досягнень науково-технічного прогресу безсумнівна. Впровадження прогресивної вібростабілізуючої обробки забезпечує, порівняно з термічним методом, зниження витрат електроенергії (газу) більш ніж у 100 разів, скорочення технологічного циклу виробництва — в 50-60 разів, підвищило в кілька разів продуктивність праці, знизило трудомісткість виготовлення і транспортні витрати в кілька разів, поліпшило умови праці і виключило забруднення навколишнього середовища. Питання вібростабілізуючої обробки деталей і конструкцій, незважаючи на актуальність, досить слабо висвітлені в літературі, що містила досить мізерні, суперечливі і частково застарілі уявлення про можливості і досягаються результати.

© В.В.Старченко, К.В. Камчатная-Степанова, Ю.М. Главчева, В.І.Волошкіна, Л.В.Клочко, М.Д.Волошкін. 2025

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виникнення залишкових напружень у процесі виготовлення

зварних і литих станин важких високоточних верстатів (Рис. 1) характеризується напруженим станом, обумовленим неоднорідністю пластичних, лінійних і об'ємних деформацій. Виникнення і перерозподіл залишкових напружень завжди пов'язане з деформацією деталі або конструкції.



Рис. 1 – Різновідності кнструкцій важких високоточних станин та металорізальних верстатів

Деформація, що виникає, може бути тимчасовою або незворотною, що викликається відповідно тимчасовими або внутрішніми напруженнями. Внутрішні напруження поділяються на напруження I роду (врівноважуються в межах областей, розміри яких одного порядку з розмірами кла, викликані неоднорідністю силового, температурного або матеріального поля всередині тіла); напруження II роду або кристалітні (врівноважуються в обсягах одного порядку з розмірами зерен) і напруження III роду (врівноважуються в обсягах одного порядку з елементарною кристалічною коміркою).

Під впливом різних технологічних операцій, що викликають зміни в металі, виникають внутрішні напруження. У деяких випадках внутрішні напруження створюються навмисно для поліпшення якісних характеристик виробу (поверхневий наклеп, гартування, хіміко-термічна обробка), а при литті, штампуванні, зварюванні, механічній обробці внутрішні напруження, що виникають, навпаки, знижують стабільність виробу, внаслідок чого знижується якість продукції.

Виникнення залишкових напружень пов'язане з різними процесами, що відбуваються в металі. Протягом однієї технологічної операції можуть діяти один або кілька факторів різної природи [6].

Температурні залишкові напруження з'являються в разі нерівномірного розподілу температури по перетину деталі. Величина і характер температурних напружень залежать від швидкості нагрівання і охолодження, від розмірів і форми деталі, від коефіцієнтів теплопровідності і теплопередачі. Велике значення має швидкість охолодження і температура, з якої починається охолодження.

З підвищенням температури, від якої проводилося охолодження, максимальні напруження збільшуються. Особливо різке збільшення напружень відбувається при $t_0 > 500^0 \text{ C}$. Найбільші напруження отримуються при максимальній швидкості охолодження у воді (осьові напруження до 600 МПа), а при охолодженні на повітрі напруження не перевищують 60 МПа.

Залишкові напруження утворюються в разі нерівномірного нагрівання по перетину деталі. При швидкому охолодженні деталі зовнішні її шари, що охолоджуються швидше, будуть розтягнуті. Серцевина під дією 60ле холодніших шарів буде стиснута. Якщо в цей момент виникаючі напруження виявляться вище межі пропорційності при даній температурі, то відбудеться пластична деформація. Можливий випадок, коли температурні напруження в зовнішніх шарах перевищать межу міцності металу і утвориться тріщина («гаряча тріщина»).

При подальшому охолодженні деталі інтенсивність охолодження зовнішніх шарів зменшується і різниця температур між поверхнею і серцевиною також зменшується. У цей момент поверхня вже має температуру, практично рівну температурі навколишнього середовища, і подальша температурна деформація зовнішніх шарів припиняється. Серцевина, що має більш високу температуру, буде продовжувати інтенсивно охолоджуватися, змінюючи об'єм. Якщо зовнішні шари були пластично деформовані в перший період, то в нексугорий момент другого періоду, коли температура серцевини ще досить висока, настає рівновага між зовнішніми шарами і серцевиною, і напруження в деталі будуть дорівнювати нулю. При подальшому охолодженні зовнішні шари будуть деформуватися мало, а серцевина буде прагнути істотно скорочуватися.

Тому серцевина буде стискати зовнішні шари, які, в свою чергу, будуть розтягувати серцевину. У момент закінчення процесу охолодження величина напружень може перевищити межу пружності і відбудеться повторна пластична деформація, але вже зворотного знака [14].

Зварні конструкції складаються з великої кількості елементів і зварних швів, внутрішні напруження яких взаємодіють і можуть розподілятися по-різному. Послідовність приварювання і жорсткість елементів істотно впливають на залишкові напруження.

Характерними особливостями зварювання є його локальний характер, високі швидкості нагрівання до температур, що перевищують температури плавлення металу (3000°C при газовому і 4000°C при електродуговому зварюванні), що викликає температурні напруження, неоднорідні структурні перетворення в шві і зонах термічного впливу, зміну розчинності газів, що оточують зварний шов. Обсяг зони розподілу залишкових напружень залежить від потужності та тривалості нагрівання, а також від структурних перетворень, що відбуваються в зоні, яка безпосередньо примикає до зварному шву (20-25 мм при електродуговому і 80 мм при газовому зварюванні).

Внаслідок структурних перетворень змінюється питомий об'єм, оскільки при нагріванні перехід перліту і фериту в аустеніт супроводжується зменшенням питомого об'єму, а при охолодженні перетворення аустеніту в маргеніт супроводжується значним збільшенням питомого об'єму. Крім того, внаслідок нерівномірного охолодження деталей структурні перетворення в усьому обсязі відбуваються не одночасно і в міру охолодження всього перетину розподіл структурних напружень змінюється. У низьковуглецевих сталях розпад аустеніту відбувається при охолодженні відбувається при температурі і мало впливає на залишкові напруження, а в легованих сталях при охолодженні розпад аустеніту при більш низьких температурах, коли метил знаходиться в пружному стані і викликає структурні залишкові напруження, тобто величина залишкових напружень, викликаних фазовими перетвореннями, залежить від хімічного складу сталі [17, 18].

На величину і характер розподілу залишкових напружень у литті впливають нерівномірне охолодження виливків, опір форми усадці металу і різниця в коефіцієнтах температурного розширення різних частин вилівка. Рівномірність охолодження у формі залежить від конфігурації деталі і складу метилу. Основне значення має не абсолютна різниця температур у різних точках, а характер їх зміни по перетину,

Крім того, при литті деталей складної форми на утворення тимчасових напружень впливає опір деформації ливарної форми і стрижнів, що знаходяться у внутрішніх порожнинах, так як різні ділянки виливків мають різні пластичні властивості і виникають сили опору стрижнів усадці металу, створюючи нерівномірний напружений стан.

Найвідповідальнішим моментом у ливарному виробництві є охолодження виливків у формі, оскільки в разі нерівномірного розподілу температури по перетину виливків виникають залишкові напруження. Напруження в основному залежать від швидкості охолодження і температури, з якої починається охолодження - різке збільшення напружень спостерігається при 500°C . Збільшення швидкості охолодження сприяє збільшенню внутрішніх напружень. Так, наприклад, при максимальній швидкості охолодження у воді виникають напруження, в 10 разів більші за напруження при охолодженні на повітрі. Неправильний вибір режиму охолодження. Охолодження може викликати викривлення деталі, появу «гарячих» або «холодних» тріщин. Охолодження при температурах нижче 400°C надає металу високу пластичність і міцність.

Особливо великий вплив на утворення залишкових напружень швидкість охолодження має при переході металу з пластичного в пружний стан (для чавуну температурний діапазон $400-700^{\circ}\text{C}$), а при температурах нижче і вище цього інтервалу вона мало позначається. На практиці охолодження металу відбувається повільно і напруження, викликані структурною неоднорідністю, мало впливають на загальний рівень напружень і зазвичай знімаються за рахунок релаксації.

Лиття є однією з найпоширеніших і найвідоміших технологічних операцій виготовлення корпусних чавунних деталей, від стабільності форми яких, що обумовлюється перерозподілом залишкових напружень, що виникають після охолодження виливків, в основному залежить точність виготовлюваних механізмів [10, 16].

Мета дослідження. Предмет дослідження: Розрахунок оптимальних умов вібростабілізації з метою найбільшого зменшення умов шліфування. Аналіз і вдосконалення технологічних особливостей шліфування станин важких токарних верстатів із метою визначення кінематичних закономірностей, дослідження механізмів утворення рельєфу шліфувального круга та оптимізації режимів обробки для забезпечення високої точності та продуктивності

Об'єкт дослідження: Шліфувальні станини важких верстатів, які проходять віброобробку на різних резонансних частотах з метою стабілізації внутрішніх напружень

Основна частина. Механічна обробка (точіння, фрезерування, шліфування тощо), як правило, викликає появу в поверхневому шарі значних залишкових напружень.

Джерелом появи залишкових напружень при механічній обробці є одночасна дія наступних факторів:

1. Нерівномірна пластична деформація поверхневого шару. У зоні перед інструментом матеріал стискається передньою поверхнею інструменту, а в іншій зоні при терті задньої поверхні інструменту оброблену поверхневий шар розтягується. Межею поділу цих зон є ріжуча кромка інструменту.

2. Локалізоване нагрівання тонких поверхневих шарів внаслідок роботи деформації і тертя призводить до великих температурних напружень, що перевищують межу плинності матеріалу. Після охолодження в

поверхневому шарі з'являються значні розтягуючі залишкові напруження.

3. Вторинні фазові перетворення в поверхневих шарах призводять до утворення вторинних структур з різними питомими об'ємами.

Вплив зазначених факторів, що діють у протилежних напрямках, призводить до того, що залишкові напруження при механічній обробці істотно залежать від технологічних режимів (геометрія і стан ріжучого інструменту, охолоджуюче середовище, вид і режим обробки). Крім того, залишкові напруження в цьому випадку залежать від матеріалу виробу.

Величина залишкових напружень при механічній обробці різанням металів середньої міцності досягає 1000-1300 МПа при глибині поширення 50-200 мкм.

При шліфуванні вирішальний вплив на утворення залишкових напружень має тепловий фактор.

Величина і знак залишкових напружень при шліфуванні залежать від швидкості обертання круга і деталі, швидкості поздовжньої подачі, глибини шліфування, а також матеріалу деталі, матеріалу і зернистості круга і охолоджуючої рідини.

Величина залишкових напружень після шліфування досягає 400- 1000 МПа, а глибина їх поширення - 20-50 мкм. 1.1.6. Напруження після гартування

Утворення залишкових напружень після гартування обумовлено головним чином швидкістю охолодження. На утворення залишкових напружень впливає хімічний склад металу, умови гартування, початкова температура і швидкість охолодження, а також вихідний стан поверхневого шару.

Істотний вплив на характер і величину сумарних напружень має час зміни знаку теплових напружень по відношенню до часу появи структурних перетворень. Якщо структурні перетворення з'явилися до зміни знаку теплових напружень, то сумарні напруження зменшуються.

Якщо структурні перетворення відбулися після зміни знаку теплових напружень, то сумарні напруження збільшуються,

При поверхневому загартованні характер ектори залишкових напружень залежить від режиму нагрівання, глибини загартованого шару, умов охолодження, хімічного складу та вихідної структури оброблюваної сталі [15]. Варіюючи частоту струму і тепловий режим нагрівання, можна отримати різну глибину загартованого шару і різний характер розподілу залишкових напружень по глибині виробу.

Зі збільшенням кількості вуглецю стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі зменшуються через переважну дію структурного фактора. Біля поверхні в загартованому шарі залишкові напруження (осьові і тангенціальні) — стискаючі. Поблизу межі шару напруження різко зменшуються і переходять в розтягуючі, максимум яких розташовується на деякій відстані від межі загартованої ділянки.

Основною причиною виникнення розтягуючих залишкових напружень поблизу твердого шару є об'ємні пластичні деформації в процесі нагрівання і охолодження. Використання віброобробки для зняття залишкових напружень і стабілізації геометричних розмірів станин.

При вібростабілізуючій обробці підведена механічна енергія сприяє ігабілізації геометричної форми виробу, так як прискорює переміщення домішкових атомів, утворення атмосфер Коттрелла і блокування дислокацій.

При циклічному навантаженні напруження, що виникають у виробі, підсумовуються із залишковими і, перевищивши межу пружності, викликають пластичну деформацію, внаслідок чого зменшуються вихідні залишкові напруження. Практично повністю залишкові напруження знімаються при залишковій деформації 0,5—1 %.

Циклічне навантаження впливає на значення залишкових напружень у разі, коли сумарні напруження перевищують межу пружності. Однак слід врахувати, що межа пружності при циклічних навантаженнях на 2(0) % нижча, ніж при статичних. Зміна залишкових напружень при циклічному навантаженні є наслідком релаксаційного процесу, а в деяких випадках - пружною наслідком.

Напруження релаксують в результаті підсумовування залишкових і циклічних змінних напружень. У момент збігу за знаком вібраційних і залишкових напружень відбувається короточасне перевантаження зварних з'єднань, викликаючи в них пластичні деформації - перш за все, в ділянках концентрації напружень. Необхідною умовою є досягнення межі плинності.

При вібраційній обробці за короткі проміжки часу створюється безліч циклів навантаження на заданих і контрольованих потужностях і частотах, що забезпечує завершення стабілізації протягом нетривалого часу.

Вібростабілізація є високопродуктивним методом зниження залишкових напружень, який придатний для литих, кованих, зварних і гарячекатаних чорних і кольорових металів. При цьому параметри міцності, твердості та довговічності не знижуються. Крім того, він застосовується до конструкцій будь-яких габаритних розмірів і маси, а обладнання, необхідне для його здійснення, є простим і малогабаритним. Це дозволяє використовувати його в безперервному технологічному процесі і в проміжних — між окремими операціями механічної обробки.

Вібростабілізуюча обробка особливо ефективна, коли термічні та інші способи зняття напружень є неприйнятними, наприклад при наявності приварених направляючих, загартованих індукційним способом після зварювання, а також в конструкціях, зварених з різних металів.

Металам властиве перетворення механічної енергії (енергії коливальних) в теплову навіть при вібраційних

навантаженнях, значення яких нижче макроскопічної межі плинності. Це пояснюється тим, що справжня межа плинності в багатьох частинах виробу нижча за теоретичну, причому при більш високих пружних напруженнях настають вже мікропластичні деформації. В кінцевому підсумку вони також є причиною зниження межі плинності при розтягуванні з тривалим навантаженням.

В області дислокацій атоми знаходяться в нестійкій рівновазі, тому для їх зміщення достатньо такого дотичного напруження, яке значно нижче напруження, необхідного для зміщення дислокації поперек решітки до наступного гальмування решітки або до межі зерна. Переміщення дислокацій являє собою зміну взаємного розташування атомів. Самі атоми переміщуються при цьому на частки міжплощинної відстані решітки. Решітка не піддається додатковій пружній деформації, і, отже, відбувається незначне накопичення енергії. Рухомі разом з дислокаціями поля внутрішніх напружень набувають найбільшої стабільності на гравіці решітки і врівноважуються між собою.

Механізм вібростабілізації в локальних зонах пояснюється наступним чином: залишкові напруження утворюються в кристалічних тілах як результат пластичної деформації кристалів. Для стабілізації напруженого стану деталі повідомляється деякий енергетичний імпульс, наприклад енергія коливальних вібростабілізації. Додаткові напруження, що виникають при цьому, підсумовуються з початковими залишковими, в результаті чого в полікристалічному матеріалі відбуваються зсуви в у кристалічній решітці, які супроводжуються перерозподілом напружень, а молекули приходять в рівноважне положення. Напруження в межах зерен і по їх межах зменшуються.

Зміна властивостей металевої деталі в локальних обсягах обумовлює процеси зміцнення, що протікають при пластичній деформації металів і деформаційному старінні, характерному для залізобуглецевих сплавів. Відомо, що пружні деформації істотно прискорюють процес деформаційного старіння. Таким чином, при пластичному деформуванні відбуваються генерація дислокацій, підвищення їх щільності, що супроводжується блокуванням вільних дислокацій атомами вуглецю і азоту. Одночасно зменшуються напруження в локальних зонах, і тим помітніше, чим вищий ступінь пластичної деформації. Однак з огляду на локальність протікання процесу в зонах концентрації напружень загальний рівень напружень першого роду змінюється незначно і напруження можуть бути стабілізовані при достатньо високому їх кінцевому рівні. Важливо, щоб в мегаїллі концентрація напружень не перевищувала його релаксаційної стійкості.

Вібраційна обробка одночасно діє на напруження першого, другого і третього роду. Зміна напружень другого і третього роду в збалансованих обсягах при відсутності напружень першого роду не впливає на форму деталі. Пружними коливаннями, поширеними в металі, впливати на локальні зони можна, але ізолювати зміну напружень в цих зонах від напружень першого роду не можна.

Ефективність вібраційної обробки визначається ступенем пластичної деформації металу, яка залежить від прикладеного навантаження. При вібрації, що визначається значенням і місцем прикладання змушувальної сили, створюваної вібробудником, а також геометричною формою деталі.

Стабілізація залишкових напружень у процесі вібраційної стабілізуючої обробки досягається за рахунок поєднання вібраційних і залишкових напружень, при певних значеннях яких матеріал стає пластичним (рис. 2).

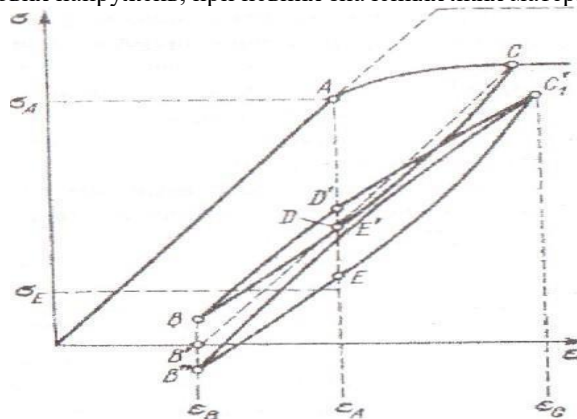


Рис. 2 – Діаграма $\sigma - \epsilon$ в процесі вібростабілізації станин важких верстатів вагою до 10000кг

Якщо в тілі, що має певні залишкові напруження, створити циклічно змінювані напруження, то процес зміни напруження для точки A може бути представлений у такому вигляді. Початковий стан характеризується напруженням σ_A і деформацією ϵ_A . Змінне навантаження здійснюється в межах $\sigma - \epsilon$.

Першому циклу навантаження відповідає ділянка графіка ACDBW. При цьому слід звернути увагу на паралельність ліній CD і пружність після зняття навантаження на всьому протязі навантаження і на невеликий спад до кінця CD — ефект Баушингера.

Наступні навантаження призводять матеріал до утворення стабільної петлі гістерезису $C_1E_1B_1E_1C_1$. Таким чином, якщо врахувати, що в початковому стані залишкові напруження відповідають напруженням OE, а зниження залишкових напружень дорівнює різниці

$\sigma_A - \sigma_E$, то кінцевий результат вібрації є функцією змінних напружень і характеристик

пружнопластичних властивостей матеріалу при циклічних навантаженнях.

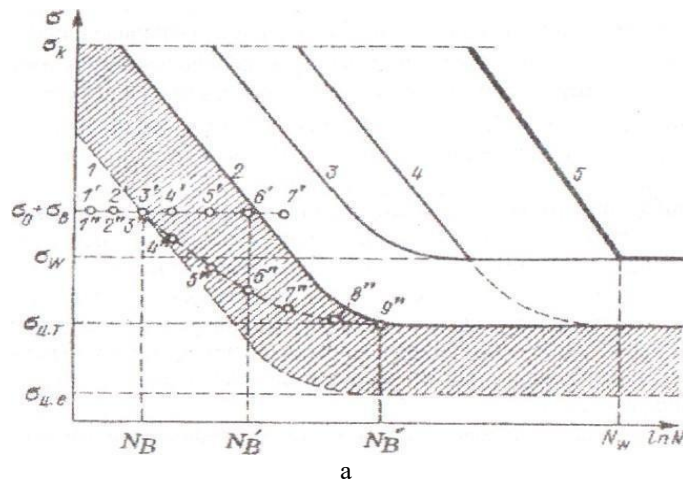
Необхідною умовою для залишкових деформацій є досягнення межі плинності при вібрації в поєднанні залишкових напружень з напруженнями, викликаними прикладанням змінних навантажень.

Межа плинності при циклічному навантаженні для деяких матеріалів може бути знижена в два рази в порівнянні з межею плинності при статичному навантаженні, в зв'язку з чим при відносно невеликих значеннях пульсуючих напружень спостерігається скорочення залишкових напружень.

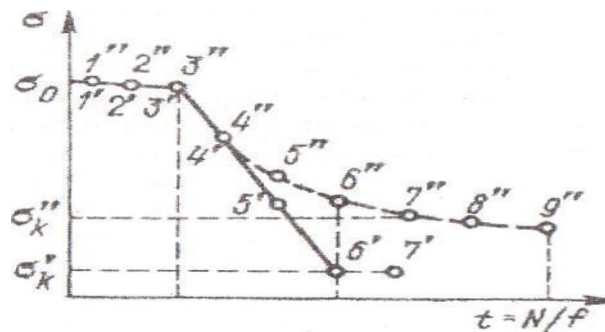
Від правильності вибору значення напруг і числа циклів навантаження залежать якість віброобробки і довговічність виробу. Крім того, природа релаксації залишкових напружень при віброобробці є циклічною і тому фізичну природу розглянутого явища пропонується проаналізувати на графіку в координатах «циклічне навантаження — число циклів» або на діаграмі втоми (рис. 1.2.) [2]. При віброобробці на стадії циклічної мікроплинності (до лінії 2) звичайні механічні властивості (межа плинності, мікротвердість та ін.) не змінюються і до її закінчення; при циклічному напруженні, рівному межі втоми, весь перетин матеріалу зазнає невеликої деформації. Експериментально встановлено, що при тривалості віброобробки не більше 10^4 циклів фіксується відносна деформація порядку 10^{-6} — 10^{-4} .

У поверхневому шарі та на межі зерен утворюється підвищена щільність дислокацій з подальшим лавиноподібним процесом протікання мікропластичної деформації спочатку в окремих зернах (з найбільшими градієнтами напружень), а потім по всьому перетину навантаженого металу. Початок інтенсивного мікропластичного течії встановлюється за зміною характеристики внутрішнього тертя і позначено на рис. 1.2 лінією 1; області макроплинності та мікроплинності розмежовані лінією 2; лінії 3, 4 і 5 відображають відповідно стадії циклічного зміцнення, утворення субмікроскопічних тріщин і втомного руйнування.

Настання стадії циклічної макротекучості пов'язане з макроскопічним розупрочненням, тобто з різким збільшенням інтенсивності «розкриття» петлі гістерезису, хоча вже в процесі макроскопічного розупрочнення деякі обсяги зміцнюються.



а



б

Рис. 3 – Схема узагальноної діаграми втоми (а) і кінетика зменшення залишкових напружень (б):

— початок мікроскопічного течії; 2 — макроскопічне течії; 3 — закінчення мікроскопічного течії; 4 — лінія початку утворення субмікроскопічних тріщин; 5 — крива втомного руйнування; σ_k — критична напруга втоми; $\sigma_{ц.г}$ — циклічна межа плинності; — межа втоми; о — циклічна межа пружності.

Ці процеси, що відбуваються на даній стадії під впливом циклічного деформування, викликані проходженням деформації Чернова-Людерса, що свідчить про нерівномірний розвиток пластичної деформації і, отже, про нерівномірний розподіл дефектів кристалічної решітки. Смуги Чернова — Людерса можуть служити

засобом аналізу поля напружень при пластичній деформації.

У маловуглецевій сталі стадія циклічного течії пов'язана з протіканням по всьому об'єму матеріалу макроскопічної пластичної деформації, що характеризується різким збільшенням щільності дислокацій по межах зерен в перліті і навколо включень, протіканням поперечного ковзання і початком формування комірчастої дислокаційної структури. Крім того, змінюються деякі фізико-механічні властивості: підвищується мікротвердість, знижується пропорційність, відбувається зміна характеристик внутрішнього тертя, магнітних властивостей та ін. Слід зазначити, що в залежності від структурного стану матеріалу, виду навантаження, температури процесу і сили деформування в умовах циклічного навантаження з початком мікроскопічної пластичної деформації можуть спостерігатися різні зміни фізико-механічних властивостей.

Виявлені вище особливості поведінки матеріалу на різних стадіях (мікро- і макротекучесги) циклічного деформування дозволяють більш точно визначити область протікання процесу зменшення залишкових напружень, відповідну стадію циклічної мікроплинності. Процес зменшення залишкових напружень в полі сумарних залишкових і вібраційних напружень починається з лінії (початку мікроскопічного течії) і закінчується лінією 2 (початком макроскопічного течії). Сумарні значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$ повинні бути меншими за критичне напруження втоми σ_{0k} , при якому на полірованій поверхні зразка з першого циклу навантаження з'являються сліди макроскопічної деформації і виникають смуги Чернова — Людерса.

Наявність побудованих для певного матеріалу ліній 1, 2 і 3 на діаграмі втоми дозволяє обґрунтовано вибирати режими віброобробки. Розглянемо перебіг процесу вібраційного зменшення залишкових напружень при сумарному значенні залишкових напружень, меншому за статичну межу мікроплинності. Як правило, віброобробку проводять при застосуванні вібраційних напружень $\sigma_v = \text{const}$. На узагальненій діаграмі втоми (рис. 3, а) відкладаємо сумарне значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$. До початку мікроскопічного течії (лінія 1) зменшення залишкових напружень майже не відбувається. Через NB цик лов, число яких залежить від сумарного значення залишкових і вібраційних цій напружень, починається пластична деформація, внаслідок чого межові напруження зменшуються, що відповідає точкам 4" — 8" (див. рис. 3). При досягненні лінії початку макроскопічного течії (точка 9') віброобробку необхідно припинити. Точка 9" відповідає циклам, Час віброобробки визначається діленням числа циклів на частоту f впливу ($t_{0br} = n / f$).

Визначивши по осі ординат значення $\sigma_0 + \sigma_v$, що відповідає точці 9" (наприклад, $\sigma_0 + \sigma_{v0}$), знайдемо значення σ_{0k} , до якого вдається знизити віброобробкою залишкові напруження.

Таким чином, завдяки нерівномірному розподілу залишкових напружень у зварних конструкціях ступінь зменшення залишкових напружень у різних точках виробу буде різним через непостійність сумарного значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$.

Можливий випадок, коли в процесі віброобробки для зменшення залишкових напружень збільшують σ_v , щоб сума залишкових і вібраційних напружень залишалася постійною: $\sigma_0 + \sigma_v = \text{const}$, внаслідок чого швидкість зменшення залишкових напружень підтримується також постійною (точки 3' — 6') і досягається найбільш повне зниження залишкових напружень. Мабуть, рівень залишкових напружень після віброобробки буде відповідати приблизно 20 % (УГ початкових σ_0). Це обумовлюється встановленням рівноваги двох процесів: анігіляції дислокацій і збільшення їх щільності шляхом генерування і подальшого гальмування дислокацій. У розглянутому випадку час віброобробки визначається числом циклів, яке значно менше часу віброобробки в попередньому випадку, що визначається числом циклів $A! v^n$. Очевидно, що при правильному виборі вібраційного впливу в процесі віброобробки можна досягти більш рівномірного зниження напруги, підвищити якість і ефективність процесу. У той же час підвищуються вимоги до часу закінчення процесу.

Таким чином, для кожного матеріалу можна вибрати прийнятні режими вібростабілізації. Очевидно, що не всі матеріали однаково можуть бути піддані вібраційній обробці з метою зменшення залишкових напружень.

Висновки.

Впровадження прогресивної вібростабілізуючої обробки забезпечує, порівняно з термічним методом, зниження витрат електроенергії (газу) більш ніж у 100 разів, скорочення технологічного циклу виробництва в 50-60 разів, підвищило в кілька разів продуктивність праці, знизило трудомісткість виготовлення і транспортні витрати в кілька разів, поліпшило умови праці і виключило забруднення навколишнього середовища. Стабілізація залишкових напружень у процесі вібраційної стабілізуючої обробки досягається за рахунок поєднання вібраційних і залишкових напружень, при певних значеннях яких матеріал стає пластичним

Список літератури

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328 с. ISBN 966-06-0247-2
2. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум [Текст]: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом «Інж. механіка»] / В. В. Попович, А. І. Кондир, Е. І. Плешаков та ін. — Львів: Світ, 2009. — 551 с. — ISBN 978-966-603-401-7
3. Матеріалознавство [Текст]: підручник / [Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.] ; ред. С. С. Дяченко ; Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. — Х. : ХНАДУ, 2007. — 440 с. — ISBN 978-

966-303-133-0

4. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. — Суми: Вид-во СумДУ, 2008. — 212 с. ISBN 978-966-657-185-7

5. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7

6. Термічна обробка // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 190. — ISBN 978-966-7407-83-4.

7. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Д. Ковалев [и др.] // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2009. — Вып. 25. — С. 90–94.

8. Технологические условия обеспечения стабилизации процесса формообразования зубчатых реек / А.А. Клочко, Н.Р. Веселовская, И.А. Билан., Д.В. Евсейчик, Е.В. Перминов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. — Краматорськ : ДДМА, 2016. — Вип. 39. — С. 117–124.

9. Литвинов В.М. Технологические особенности спрерной закалки крупногабаритных зубчатых колес в тяжелом машиностроении / В.М. Литвинов, Е.В. Мироненко, А.Н. Шелковой, М.И. Гасанов, А.А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2016. — Вып. 38. — С. 51–59.

10. Литвинов В.М. Уникальная технология ручной кислородной резки заготовок из углеродистых, высоколегированных сталей и чугуна толщиной до 1000 мм в условиях предприятий тяжелого машиностроения с учетом конструктивных особенностей ручного резака / В.М. Литвинов, А.А. Клочко, А. Н. Лищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х.: НТУ «ХП», 2016. — №5 (1177). С. 110-115. — Бібліогр.: 6 назв. — ISSN 2079-004X

11. Пермяков О.А., Клочко О.О., Веселовська Н.Р., Синиця Ю.О. Технологічне забезпечення підвищення параметрів точності та якості зубчастих рейок важких верстатів з ЧПК. // Вісник Національного технічного університету «ХП». 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 «ХП», 2018. — № 6 (1282) 2018. — С. 72–77. — ISSN 2079-004X.

12. Перминов С.В., Клочко О.О. Технологічне забезпечення точності та довговічності зубчастих передач приводів верстатів // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів (17–20 квітня 2018 року): матеріали конференції: у 3-х ч. — Ч. 3 / за ред. проф. Є.І. Сокола. — Харків : НТУ «ХП», 2018. — С. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (повне вид.) ISBN 978-617-05-0267-4 (ч. 3).

13. Ковальов В.Д., Гасанов М.І., Клочко О.О., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і відновлюватимуться. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 21 – 24 грудня 2020 року / За заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2020. — С. 51 – 52. ISBN 978-966-379-959-9.

14. Предпосылки управления технологическими процессами с использованием искусственных нейронных сетей. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 21 – 24 грудня 2020 року / За заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2020. — С. 80. ISBN 978-966-379-959-9.

15. Равська Н.С., Корбут Є.В., Івановський О.А., Родин Р.П., Парненко В.С., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Сапон С.П., Rolahd Logosh. Модифікований спрощений алгоритм методу групового врахування аргументів в імітаційному моделюванні процесами. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. — Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. — С. 48 –50.

16. С.В. Артьомова. Термічна обробка і властивості литої складнопрофільної лопаті гідротурбіни / С.В. Артьомова, О.І. Пономаренко, О.С.Бударін, В.С. Бондаренко, О.М. Безвесільна, А.П. Марченко, О.В. Акімов.// Металознавство та обробка металів. –2022. — № 28 (102). — С. 58-63. <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058>

References (transliterated):

1. Khilchevskiy V. V. Materialoznavstvo i tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: Navchalnyi posibnyk. K.: Lybid, 2002. — 328 s. ISBN 966-06-0247-2

2. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo. Praktykum [Tekst]: [navch. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. za napriamom «Inzh. mekhanika»] / V. V. Popovych, A. I. Kondyr, E. I. Pleshakov ta in. — Lviv: Svit, 2009. — 551 s. — ISBN 978-966-603-401-7

3. Materialoznavstvo [Tekst]: pidruchnyk / [Diachenko S. S., Doshchekina I. V., Movlian A. O., Pleshakov E. I.] ; red. S. S. Diachenko ; Kharkivskiy nats. avtomobilno-dorozhniy un-t. — Kh. : KhNADU, 2007. — 440 s. — ISBN 978-966-303-133-0

4. Budnyk A. F. Typove obladnannia termichnykh tsekhiv ta dilnyts: Navchalnyi posibnyk. — Sumy: Vyd-vo

SumDU, 2008. — 212 s. ISBN 978-966-657-185-7

5. Buchynskiy M. Ya., Horyk O. V., Cherniavskiy A. M., Yakhin S. V. OSNOVY TVORENNIA MASHYN / [Za redaktsiieiu O. V. Horyka, doktora tekhnichnykh nauk, profesora, zasluženoho pratsivnyka narodnoi osvity Ukrainy]. — Kharkiv: Vyd-vo «NTMT», 2017. — 448 s. : 52 il. ISBN 978-966-2989-39-7

6. Termichna obrobka // Terminolohichnyi slovnyk-dovidnyk z budivnytstva ta arkhitektury / R. A. Shmyh, V. M. Boiarchuk, I. M. Dobrianskyi, V. M. Barabash ; za zah. red. R. A. Shmyha. — Lviv, 2010. — S. 190. — ISBN 978-966-7407-83-4.

7. Vybrostablyzyruishchaia obrabotka krupnohabarytnykh zubchatykh koles / E. V. Myronenko, A. A. Klochko, V. D. Kovalev [y dr.] // Nadezhnost ynstrumenta y optymizatsiia tekhnolohycheskykh system: sb. nauch. tr. — Kramatorsk : DHMA, 2009. — Выр. 25. — S. 90–94.

8. Tekhnolohycheskye uslovyia obespecheniia stablyzatsyy protsessa formoobrazovaniia zubchatykh reek / A.A. Klochko, N.R. Veselovskaia, Y.A. Bylan., D.V. Evseichyk, E.V. Permynov // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: zb.nauk. pr. — Kramatorsk : DDMA, 2016. — Выр. 39. — S. 117–124.

9. Lytvynov V.M. Tekhnolohycheskye osobennosti spreernoi zakalky krupnohabarytnykh zubchatykh koles v tiazhelom mashynostroenyy / V.M. Lytvynov, E.V. Myronenko, A.N. Shelkovoii, M.Y. Hasanov, A.A. Klochko // Nadezhnost ynstrumenta y optymizatsiia tekhnolohycheskykh system : sb. nauch. tr. — Kramatorsk : DHMA, 2016. — Выр. 38. — S. 51–59.

10. Lytvynov V.M. Unykalnaia tekhnolohiia ruchnoi kyslorodnoi rezky zahotovok yz ughlerodystykh, vysokoleghirovannykh stalei y chuhuna tolshchynoi do 1000 mm v uslovyiakh predpriiatyi tiazheloho mashynostroeniia s uchetom konstruktivnykh osobennosti ruchnoho rezaka / V.M. Lytvynov, A.A. Klochko, A. N. Lyshenko // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. — Kh.: NTU «KhPI», 2016. — №5 (1177). S. 110-115. — Bibliohr.: 6 nazv. — ISSN 2079-004X

11. Permiakov O.A., Klochko O.O., Veselovska N.R., Synytsia Yu.O. Tekhnolohichne zabezpechennia pidvyschennia parametriv tochnosti ta yakosti zubchastykh reioik vazhkykh verstativ z ChPK. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». — Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. — № 6 (1282) 2018. — S. 72–77. — ISSN 2079-004Kh.

12. Perminov Ye.V., Klochko O.O. Tekhnolohichne zabezpechennia tochnosti ta dovhovichnosti zubchastykh peredach pryvodiv verstativ // KhII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv (17–20 kvitnia 2018 roku): materialy konferentsii: u 3-kh ch. — Ch. 3 / za red. prof. Ye.I. Sokola. — Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. — S. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (povne vyd.) ISBN 978-617-05-0267-4 (ch. 3).

13. Kovalov V.D., Hasanov M.I., Klochko O.O., Vasylichenko Ya.V., Shapovalov M.V. Kryterii formuvanniia struktur i parametriv system obrobky, shcho zabezpechiut zadani ekspluatatsiini vlastyvoli zubchastykh kolis, yaki znoshuiutsia i vidnovliuvatymutsia. Vazhke mashynobuduvanniia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii 21 – 24 hrudnia 2020 roku / Za zah. red. V. D. Kovalova. — Kramatorsk: DDMA, 2020. — S. 51 – 52. ISBN 978-966-379-959-9.

14. Predposylky upravleniia tekhnolohycheskymy protsessamy s yspolzovanyem yskusstvennykh neironnykh setei. Vazhke mashynobuduvanniia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii 21 – 24 hrudnia 2020 roku / Za zah. red. V. D. Kovalova. — Kramatorsk: DDMA, 2020. — S. 80. ISBN 978-966-379-959-9.

15. Ravska N.S., Korbut Ye.V., Ivanovskiy O.A., Rodyn R.P., Parnenko V.S., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Sapon S.P., Rolahd Loroeh. Modyfikovani sprosycheni alhorytm metodu hrupovoho vrakhuvanni arhumentiv v imitatsiinomu modeliuvanni protsesamy. Zbirnyk naukovykh prats KhI Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Protsesty mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument», 5–6 lystopada 2021 roku. — Zhytomyr : Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», 2021. — S. 48 –50.

16. S.V. Artomova. Termichna obrobka i vlastyvoli lytoi skladnoprofilnoi lopati hidroturbiny / S.V. Artomova, O.I. Ponomarenko, O.S. Budarin, V.S. Bondarenko, O.M. Bezvesilna, A.P. Marchenko, O.V. Akimov. // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. —2022. — № 28 (102). — S. 58-63. <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058>

Надійшла (received) 10.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Старченко Віталій Валерійович (Vitaly Starchenko) – аспірант кафедри інтегрованої технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: pern_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108

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

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

Волошкіна Ірина Віталіївна (Voloshkina Iryna) - завідувачка навчальною лабораторією, доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6735-2578>; mob.:0972992901; e-mail: voloshkina.irina1@gmail.com

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

Волошкін Микита Дмитрович (Voloshkin Mykyta) - здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, Харківський національний університет радіоелектроніки, факультет інформаційних радіотехнологій і медіаінженерії, кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5111-5264> ;mob.:0972992085; e-mail: mykyta.voloshkin.2007@gmail.com

ДЯДЯ С. І., КОЗЛОВА О. Б., ЯХНО Д. А., СУДНИК А. В.

ВПЛИВ ЧАСУ РІЗАННЯ НА ПАРАМЕТРИ КОЛИВАНЬ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

У статті розглядається можливість використання часу різання для визначення умов різання через розрахунок визначального співвідношення. За його значенням визначається одна з п'яти швидкісних зон коливань. Серед них найбільш несприятливою для отримання якості обробленої поверхні є третя швидкісна зона коливань. Для виходу з цієї зони без зменшення швидкості різання пропонується використовувати технологічні прийоми, які збільшують час різання. Зокрема, за рахунок збільшення кута нахилу гвинтової різальної кромки кінцевої фрези. Це дозволяє призначити таке значення кута нахилу, при якому за рахунок часу різання величина визначального співвідношення наближається до другої швидкісної зони коливань, в якій демфуючі властивості процесу різання суттєво зменшують інтенсивність коливань та забезпечують стабільне фрезерування.

Ключові слова: фрезерування, коливання, різальна кромка, кут нахилу, час різання

DYADYA S., KOZLOVA O., YAKHNO D., SUDNIK A.

THE INFLUENCE OF CUTTING TIME ON THE VIBRATION PARAMETERS DURING FINISH MILLING

The article considers the possibility of using cutting time to determine cutting conditions through the calculation of the determining ratio. One of the five speed zones of oscillation is determined by its value. Among them, the third speed oscillation zone is the most unfavorable for obtaining the quality of the machined surface. To exit this zone without reducing the cutting speed, it is proposed to use technological techniques that increase the cutting time. In particular, by increasing the angle of inclination of the helical cutting edge of the end mill. This allows you to assign such a value of the angle of inclination at which, due to the cutting time, the value of the determining ratio approaches the second speed oscillation zone, in which the damping properties of the cutting process significantly reduce the intensity of oscillations and ensure stable milling.

Keywords: milling, oscillations, cutting edge, angle of inclination, cutting time.

1. Вступ. Якість поверхні складнопрофільних тонкостінних деталей, які широко використовуються у авіакосмічній техніці, після кінцевого фрезерування залежить від умов, при яких відбувається обробка. Чисельними дослідженнями [1, 2 та інші] встановлено, що найбільший вплив при цьому мають вібрації. Джерелом їх виникнення є змушуюча сила, що діє на деталь при врізанні зуба інструмента. Тобто при кінцевому фрезеруванні завжди є збудник вимушених коливань. Встановлено, що діючі при різанні коливання виникають у певній послідовності [3]. Спочатку при врізанні зуба інструменту діють вимушені коливання, на які накладаються супроводжуючі вільні коливання (СВК), що згодом згасають. При цьому слід відзначити, що через короткочасність кінцевого фрезерування, що є його особливістю, поширені при точінні та торцевому фрезеруванні сталі автоколивання не виникають [4].

Використання визначального співвідношення (BC), яке розраховується за формулою (1) [5], дозволяє визначити одну з п'яти швидкісних зон коливань і види коливань, що діють в них при кінцевому фрезеруванні.

$$BC = \frac{t_{piz}}{T_{BK}}, \quad (1)$$

де t_{piz} – час різання, с, T_{BK} – період вільних коливань деталі, с.

BC для кожної швидкісної зони коливань обмежується певними величинами [5].

Для розрахунку часу різання та періоду вільних коливань використовуються формули (2) [5] та (3) [6].

$$t_{piz} = \frac{60}{\pi d n} \cdot \left[\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) \pm \frac{1}{2} S_z + t g \omega \cdot a_p \right] \quad (2)$$

де n , d , a_e , a_p , S_z , ω – частота обертання шпинделя (об/хв), діаметр фрези (мм), радіальна глибина різання (мм), осьова глибина різання (мм), подача на зуб (мм/зуб), кут нахилу гвинтової різальної кромки (град) відповідно.

$$T_{BK} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{j}}, \quad (3)$$

де m , j – маса (кг) та жорсткість тонкостінного елемента деталі (Н/м) відповідно.

Загалом, кінцеве фрезерування може відбуватися у будь-якій з п'яти швидкісних зон коливань. На це впливає залежність швидкості різання від властивостей матеріалу, що оброблюється. В першій, четвертій та п'ятій швидкісних зонах коливань при різанні діють тільки вимушені коливання. Але якість поверхні у першій швидкісній зоні при великому часі різання низька і визначається слідами пластичного зсуву матеріалу, що залишається на обробленій поверхні. СВК деталі не з'являються через великі демфуючі властивості процесу різання. При високошвидкісному фрезеруванні у четвертій та п'ятій швидкісних зонах час різання менший за період СВК, тому вони не виникають. Якість поверхні в цих двох зонах висока і визначається кратністю співвідношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань [7]. СВК, що діють у другій та третій швидкісних зонах коливань, мають різну інтенсивність і вплив на оброблену поверхню. Якщо в другій швидкісній зоні коливань амплітуда СВК менше 0,02мм, що сприяє стружкоутворенню, і вони згасають до кінця різання, то в третій швидкісній зоні коливань вона значно зростає і не згасає до кінця різання. Саме в

третьої швидкісній зоні коливань діють СВК великої інтенсивності, що впливає на стійкість інструменту, а оброблена поверхня має найбільшу хвилястість. Слід зазначити, що інтенсивність СВК залежить від початкової швидкості різання, з її збільшенням вона зростає. Тому актуальною стоїть задача забезпечення стійкості інструменту та якості поверхні, що обробляється в третій швидкісній зоні коливань без зменшення швидкості різання, від якої залежить продуктивність фрезерування.

Одним з напрямків рішення цієї задачі є використання демпфуючих властивостей процесу різання, дія яких найбільше проявляється у першій ($VC \geq 25$) та другій ($7 < VC < 25$) швидкісних зонах коливань. Це можливо за рахунок достатнього часу різання, щоб демпфування відбулося. Згідно формули (2) на збільшення часу різання впливають радіальна глибина різання a_e , подача S_z та кут нахилу гвинтової різальної кромки ω . Але, якщо збільшення радіальної глибини та подачі суттєво впливає на силу різання, то від кута нахилу вона мало залежить [5]. Тому в даній роботі розглядається вплив кута нахилу різальної кромки ω на час різання та демпфуючі властивості процесу різання при цьому.

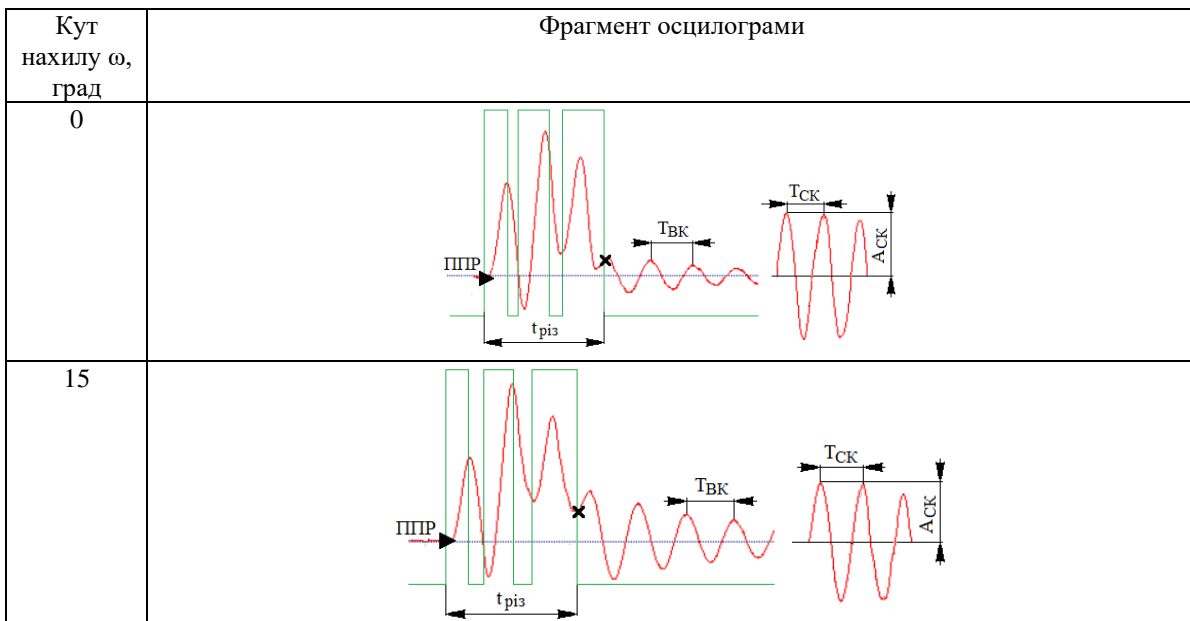
2. Методика досліджень. Дослідження проводилися на спеціальному стенді [5], конструкція якого дозволяє регулювати жорсткість пружного елемента і моделює тонкостінний елемент деталі, встановлювати для обробки зразки з різних матеріалів та відмічати час різання. В якості інструменту використовувалася спеціальна однозуба фреза діаметром $d = 50$ мм, конструкція якої передбачає регулювання кута нахилу гвинтової різальної кромки [5]. Режими різання обиралися для фрезерування деталі, що мала частоту вільних коливань $f_{BK} = 488$ Гц, в третій швидкісній зоні коливань ($1 \leq VC \leq 7$): $n = 280$ об/хв, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 4$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб, при кутах нахилу гвинтової різальної кромки $\omega = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і зустрічному напрямку подачі.

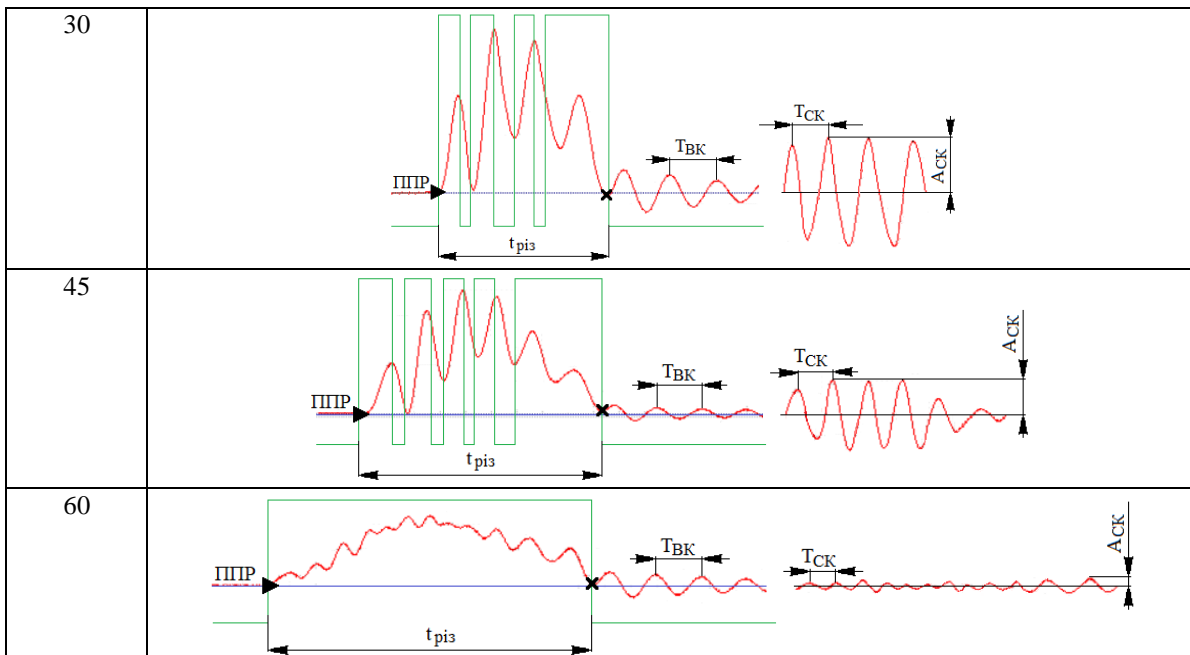
При дослідженнях записувалися осцилограми коливань деталі та час різання. При обробці осцилограми поділялися на окремі фрагменти (рис.1), на яких вимірялися час різання $t_{риз}$, період СВК $T_{СК}$ та їх амплітуда $A_{СК}$, період вільних коливань деталі T_{BK} . Для спрямлення фрагментів осцилограми використовувався фільтр Савицького - Голея [5].

Результати вимірювання наведені у таблиці 1.

Таблиця 1- Час різання, період та амплітуда коливань СВК при фрезеруванні з різними кутами нахилу різальної кромки ω

Кут нахилу ω , град	Час різання $t_{риз}$, 10^{-3} с	Амплітуда СВК, $A_{СК}$, мм	Період СВК / частота, T_{BK} / f_{BK} 10^{-3} с/ Гц
0	6,12	0,080	1,92 / 520
15	6,72	0,069	1,92 / 520
30	8,58	0,069	1,86 / 537
45	11,58	0,041	1,68 / 595
60	15,90	0,008	1,2 / 833





► - точка врізання інструменту в деталь; × - точка виходу інструменту з деталі; ППР – положення пружної рівноваги;
 Рис. 1 – Фрагменти осцилограм при кінцевому фрезеруванні з різними кутами нахилу різальної кромки ω

Дані, які наведені в таблиці 1, показують, що зі збільшенням кута нахилу ω від 0 до 60° час різання збільшується, а інтенсивність коливань зменшується у 10 разів. Крім цього слід зауважити, що період СВК $T_{СК}$ при фрезеруванні з різними кутами нахилу ω більший за період вільних коливань деталі $T_{ВК}$ на 6%-41%.

У таблиці 2 наведені значення ВС, що розраховані за формулою (1). при різанні з різними кутами нахилу ω .

Таблиця 2 - Значення визначального співвідношення при різанні з різними кутами нахилу ω

Кут нахилу ω , град	0	15	30	45	60
Визначальне співвідношення (ВС)	2,98	3,28	4,18	5,65	7,75

Зі збільшенням кута нахилу ω також збільшується значення ВС, які зміщуються у бік другої швидкісної зони коливань [5], а фрезерування з кутом нахилу $\omega = 60^\circ$ відбувається вже у ній і супроводжується малою інтенсивністю коливань $A_{СК} = 0,008$ мм.

Залежність часу різання $t_{різ}$ від кута нахилу ω пов'язана зі зміною довжини контакту інструменту з деталлю при різанні $l_{різ}$ (рис. 2), яка збільшується зі збільшенням кута ω . При цьому змінюються умови контактування фрези та деталі при різанні, на що впливає довжина активної різальної кромки $l_{арк}$, яка утворюється при проходженні зуба фрези через поверхню різання (рис. 2).

При фрезеруванні довжина активної різальної кромки за умови, що $\omega > 0$, змінюється від мінімального значення при врізанні зуба до найбільшого при проходженні зубом повної осьової глибини a_p і далі поступово зменшується до мінімуму на виході з деталі.

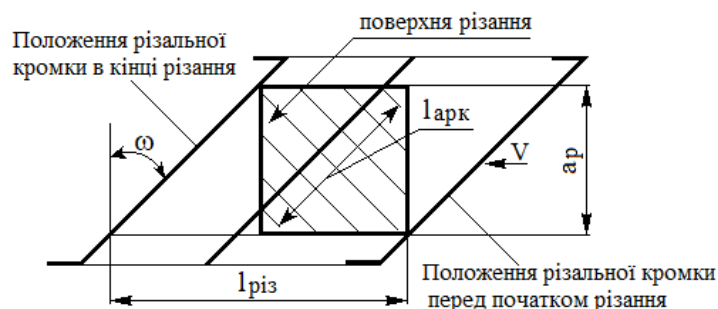


Рис. 2 – Схема визначення довжини активної різальної кромки $l_{арк}$

Найбільша довжина активної різальної кромки в залежності від кута нахилу ω визначається за формулою (4):

$$l_{\text{арк}} = \frac{a_p}{\cos\omega} \quad (4)$$

Демпфуючі властивості шару, що зрізається при кутах нахилу ω від 0 до 45°, при фрезеруванні у третій швидкісній зоні коливальні недостатні для створення сталих умов різання. Хоч амплітуда і зменшується на 50% від $A_{СК} = 0,080$ мм до $A_{СК} = 0,041$ мм, але ці величини більші за сприятливі для стружкоутворення $A_{СК} = 0,020$ мм.

Фрагмент осцилограми, який записаний при фрезеруванні з кутом нахилу $\omega=60^\circ$ (рис. 1), показує, що СВК, виникаючі на початку різання, затухають до ділянки, де довжина активної різальної кромки найбільша. Далі відбувається зменшення демпфуючих властивостей шару, що зрізається, і відбувається від'ємне затухання, при якому спостерігається незначне збільшення амплітуди СВК.

Висновки. Використання розподілу на швидкісній зоні коливальних за допомогою визначального співвідношення дозволяє за отриманими значеннями визначити умови фрезерування. При цьому найбільш несприятливою для отримання якісної обробленої поверхні є третя швидкісна зона коливальних. Щоб вийти з цієї зони, не зменшуючи швидкість різання, можливо використовувати технологічні прийоми, що збільшують час різання. Одним з них є кут нахилу гвинтової різальної кромки ω , збільшення якого збільшує час різання. При цьому значення ВС зміщуються в бік другої швидкісної зони коливальних, що супроводжується зменшенням інтенсивності СВК. Використовуючи розрахунки часу різання при різних кутах нахилу ω та періоду вільних коливальних деталі підбирають значення ВС, що відповідають умовам фрезерування у другій швидкісній зоні коливальних. Таким чином за рахунок часу різання створюють стає фрезерування.

Список літератури:

1. Brian Stone. Chatter and Machine Tools. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 268 p. DOI 10.1007/978-3-319-05236-6.
2. Kai Cheng. Machining Dynamics Fundamental. Applications and Practices Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009. 341 p. DOI 10.1007/978-1-84628-368-0.
3. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. / Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev. // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci, 2023. Vol. 9, № 1: 53-66. DOI: <https://doi.org/10.23939/ujmems2023.01.053>.
4. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling. / S Dyadya, Y Vnukov, O Kozlova, P Trishyn // Springer Nature Switzerland AG 2024. V. Tonkonogyi et al. (Eds) InterPartner 2023, LNME, pp. 136–144, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_13.
5. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей [Электронный ресурс]: монография / [Внуков Ю. Н., Дядя С. И., Козлова Е. Б и др.]; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье: ЗНТУ, 2017.-208 с.
6. Кузмичев Е.В. Законы и формулы физики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 884 с.
7. Chatter suppression techniques in metal cutting. / Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G. // Manufacturing Technology 65, 785–808 (2016). DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.

References (transliterated)

1. Brian Stone. Chatter and Machine Tools. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 268 p. DOI 10.1007/978-3-319-05236-6.
2. Kai Cheng. Machining Dynamics Fundamental. Applications and Practices Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009. 341 p. DOI 10.1007/978-1-84628-368-0.
3. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. / Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev. // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci, 2023. Vol. 9, № 1: 53-66. DOI: <https://doi.org/10.23939/ujmems2023.01.053>.
4. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling. / S Dyadya, Y Vnukov, O Kozlova, P Trishyn // Springer Nature Switzerland AG 2024. V. Tonkonogyi et al. (Eds) InterPartner 2023, LNME, pp. 136–144, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_13.
5. Self-oscillations during milling of thin-walled elements of parts [Electronic resource]: monograph / [Vnukov Yu. N., Dyadya S. I., Kozlova O.B. and others]; under the editorship Yu. N. Vnukova - Electron. data – Zaporozhye: ZNTU, 2017.-208 p.
6. Kuzmychev E.V. Laws and formulas of physics. - Kyiv: Nauk. dumka, 1989. - 884 p.
7. Chatter suppression techniques in metal cutting. / Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G. // Manufacturing Technology 65, 785–808 (2016). DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дядя Сергій Іванович (Dyadya Sergei) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7457-7772>; тел.: (050) 996-19-96; e-mail: djadja@zpu.edu.ua.

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

Яхно Денис Анатолійович (Yakhno Denys) – студент кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2816-9397>; тел.: (096)554-90-00; e-mail: Yakhno@gmail.com.

Судник Анна Володимирівна (Sudnyk Hanna) – студентка кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1810-6030>; тел.: (093)631-37-81; e-mail: annasudnik@gmail.com.

ОХРИМЕНКО О. А., МАЙБОРОДА В. С., ЗАКОВОРОТНИЙ О. Ю., ГАСАНОВ М. І., КЛОЧКО О. О., ГЛУШКО С. С., ФЕДОРЕНКО В. С.

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ПОБУДОВІ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ МОДЕЛІ ІМПУЛЬСНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

Для синхронізації швидкостей обертання приводних двигунів пропонується інтелектуальна система управління швидкістю електропривода з двигуном постійного струму, на базі штучної нейронної мережі. В такій системі управління пропонується використати контролер - нейронну мережу разом з контролером - нейромережевою еталонною моделлю [2]. Основним коригувальним сигналом для цієї системи буде похибка в різниці кутових швидкостей двигунів експериментальної і еталонної моделей. Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготівлі. Для коректного порівняння показників високошвидкісного зубофрезерування, виконуваного при безперервному обертанні та подачі різця і при імпульсному фрезеруванні, була побудована модель експериментальної установки, що складається з двох блоків. Для глобальної оптимізації параметрів нейромережевої системи використовувався метод генетичного алгоритму (ГА). Розглядаючи її як єдиний набір параметрів, ГА здатна здійснювати його оптимальну настройку при розмірах пошукового простору, достатніх для вирішення більшості практичних завдань. У той же час спектр розглянутих додатків значно перевищує можливості алгоритму зворотного поширення. Точність вимірювання вихідних параметрів забезпечується синхронізацією еталонного і випробуваного двигунів за рахунок використання нейро-мерелінного контролера.

Ключові слова: швидкісне зубофрезерування, нейромережевий контролер, інтелектуальна система управління, штучна нейронна мережа, імпульсне фрезерування, режими різання, деформація, метод генетичного алгоритму

OKHRIMENKO O., MAYBORODA V., ZAKOVOROTNIY O., GASANOV M., KLOCHKO O., . GLUSHKO S., FEDORENKO V. USE OF NEURAL NETWORKS IN CONSTRUCTION OF A RESEARCH MODEL OF PULSE GEAR MILLING

To synchronize the rotation speeds of the drive motors, an intelligent speed control system for an electric drive with a DC motor is proposed, based on an artificial neural network. In such a control system, it is proposed to use a controller - a neural network together with a controller - a neural network reference model [2]. The main corrective signal for this system will be the error in the difference in the angular velocities of the motors of the experimental and reference models. Increasing the efficiency of processes in high-speed gear milling with a blade tool necessitates in-depth studies of the physical laws that accompany the separation of the layer from the workpiece. For a correct comparison of the indicators of high-speed gear milling performed with continuous rotation and feed of the cutter and with pulse milling, a model of an experimental installation was built, consisting of two blocks. For global optimization of the parameters of the neural network system, the genetic algorithm (GA) method was used. Considering AI as a single set of parameters, GA is able to perform its optimal tuning with the search space sizes sufficient to solve most practical problems. At the same time, the range of applications considered significantly exceeds the capabilities of the backpropagation algorithm. The accuracy of measurement of output parameters is ensured by synchronization of the reference and test engines through the use of a neuro-merelin controller.

Keywords: high-speed gear milling, neural network controller, intelligent control system, artificial neural network, pulse milling, cutting modes, deformation, genetic algorithm method

Вступ. Для вивчення ефективності імпульсного зубчастого фрезерування необхідно побудувати експериментальну модель, що складається з 2 блоків. Перший блок є еталонною моделлю і виконує зубофрезерування за класичною схемою, де фреза приводиться в рух двигуном з постійною швидкістю обертання і із заданою швидкістю подачі. Другий блок має ідентичні характеристики механічної частини, але робочий орган виконує фрезерування зубчастих коліс в імпульсному режимі. Поставлена задача синхронізації швидкості обертання електродвигунів обох агрегатів для того, щоб дати можливість порівняти вихідні параметри зубчастого фрезерування електричної частини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Раніше була запропонована модель дослідження енергоефективності імпульсного швидкісного зубофрезерування з урахуванням атомного підходу [1]. Для коректного аналізу вихідних даних необхідно порівняти її з аналогічною системою, що працює в постійному режимі. Для синхронізації швидкостей обертання приводних двигунів пропонується інтелектуальна система управління швидкістю електропривода з двигуном постійного струму, на базі штучної нейронної мережі. В такій системі управління пропонується використати контролер - нейронну мережу разом з контролером - нейромережевою еталонною моделлю [2]. Основним коригувальним сигналом для цієї системи буде похибка в різниці кутових швидкостей двигунів експериментальної і еталонної моделей. Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготівлі [6].

Основна частина. Для коректного порівняння показників високошвидкісного зубофрезерного фрезерування, виконуваного при безперервному обертанні та подачі різця і при імпульсному фрезеруванні, була побудована модель експериментальної установки, що складається з 2 блоків, структурна схема яка представлена на Рис.1.

Обидва блока мають однаковий робочий орган (фреза Ф), яка фрезерує один і той же тип матеріалу з однаковою швидкістю подачі. Силowym агрегатом в даній установці є двигун постійного струму (ДПС₁ і ДПС₂). У еталонній моделі передача крутного моменту від ДПС₁ до Ф здійснюється безпосередньо, в досліджуваній моделі схема реалізована із залежного обертання 2-х мас, в якій ДПС₂ обертається з постійною швидкістю на номінальній потужності, а електромагнітна муфта ЕМ управляється осцилюючим сигналом і має 2 положення.

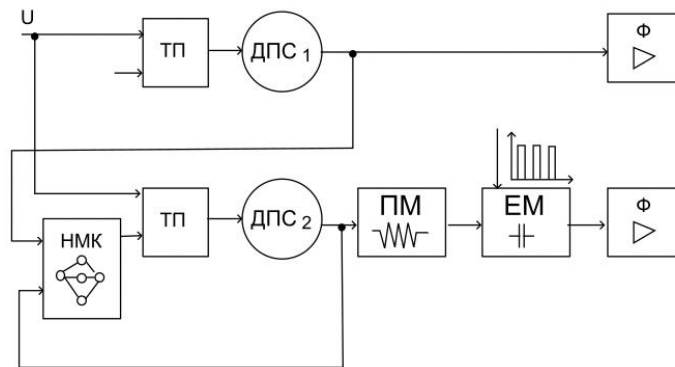


Рис.1 – Структурна схема експериментальної установки імпульсного швидкісного зубофрезерування з використанням пружної та електромагнітної муфти та нейромережевого контролера керування двигуном постійного струму

Коли ЕМ замкнута, механічна передача обертаючого моменту від двигуна на фрезу заблокована і проходить накопичення обертаючого моменту за рахунок обертання валу в пружній муфті. У момент розмикання ЕМ накопичена енергія передається на фрезу Ф і використовується для її подальшого просування в заготовці.[1]

Для управління обертанням електродвигунів використовується тиристорний перетворювач ТП. В еталонній моделі керуючий сигнал забезпечує безперервну, задану швидкість обертання ДПС₁. У досліджуваній моделі швидкість обертання ДПС₂ синхронно с ДПС₁ забезпечує нейромережевий контролер НМК.

Застосування інтелектуальних систем управління, з використанням нейромережевого контролера управління швидкістю забезпечує стійке управління електроприводом з Запропонована система дозволяє контролювати реальну швидкість ротора для виконання точного відслідковування сигналів еталонної моделі в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Використання похибки між вихідними сигналами швидкості еталонної моделі та реального електродвигуна забезпечує зміну вагових коефіцієнтів та коефіцієнтів опорних сигналів зміщень [2]

Структурно-алгоритмічна схема експериментальної установки представлена на Рис.2

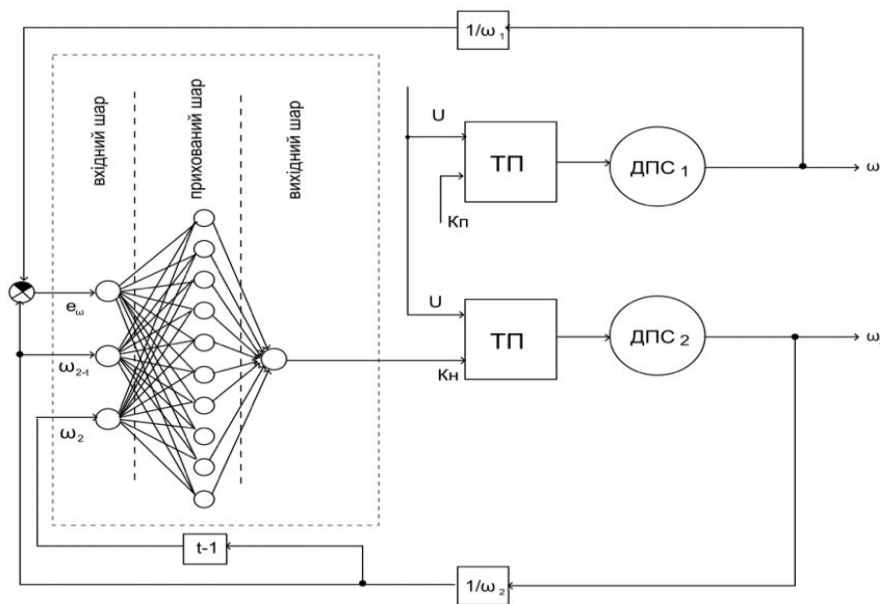


Рис.2 – Структурно-алгоритмічна схема експериментальної установки з використанням нейромережевого контролера керування електродвигуном постійного струму

Як показали раніше проведені дослідження [3, 12, 20], для реалізації систем управління замкнутим циклом з нейромережевим регулятором для управління електродвигуном постійного або змінного струму цілком достатньо одного зворотного зв'язку по швидкості ω_2 , з дискретизацією часу і однієї ланки чистої затримки $\omega_2 \cdot t$. Таким чином, у НС буде 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточна і попередня частота обертання двигуна ДПС₂. Сигналом завдання є похибка різниці кутових швидкостей еталонного двигуна ω_1 і досліджуваної моделі ω_2 .

Таким чином, нейронна мережа матиме 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточного та попереднього значення швидкості другої маси. Мінімально-достатня кількість нейронів прихованого шару таких систем дорівнює 10 – 20, а вихідних нейронів у разі потрібно один. На цьому вихідному нейроні і формуватиметься керуючий вплив для частотного перетворювача. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3–20–1 [8, 13, 14, 15]

Завдання синтезу нейронних мереж полягає у визначенні ваг і сигналів зсуву нейронів прихованого і вихідного шарів, які б забезпечували необхідний контроль [3]. Для вирішення цієї проблеми зазвичай використовується алгоритм зворотного поширення (Backpropagation) [4], який по суті є методом градієнтного спуску і тому має відомий недолік – локалізацію області мінімізації. Між тим, простір синтезованих параметрів має настільки велику розмірність (51 параметр), що вимагає застосування методів глобальної оптимізації.

Для глобальної оптимізації параметрів нейромережевої системи необхідно використовувати метод генетичного алгоритму (ГА) [5, 9, 10]. Розглядаючи її як єдиний набір параметрів, ГА здатна здійснювати його оптимальну настройку при розмірах пошукового простору, достатніх для вирішення більшості практичних завдань. У той же час спектр розглянутих додатків значно перевищує можливості алгоритму зворотного поширення.

Як показали раніше проведені моделювання, [2, 11, 18], запропонована інтелектуальна система управління, яка складається з НМК, забезпечує надійний контроль швидкості і стійкі характеристики регулювання при невизначеності параметрів і зовнішнього навантаження. (Рис.3)

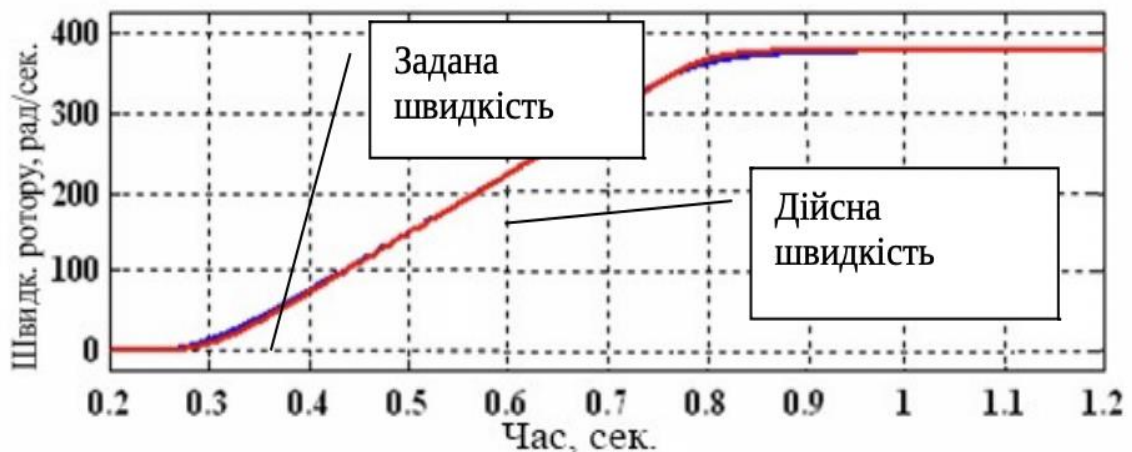


Рис.3 – Швидкість обертання еталонного і дослідного електродвигуна в момент пуску з управлінням НМК

Слід зазначити, що в процесі досліджень, незважаючи на однакову швидкість обертання електродвигунів, оброблювані матеріали можуть зазнавати різні види деформацій з утворенням різного роду стружки.

Схильність оброблюваних матеріалів до деформаційного зміцнення залежить від їхньої електронної та дислокаційної структури, наявності домішок, швидкості деформування, температури, типу кристалічної решітки, радіуса заокруглення ріжучої кромки r , а також від швидкості перебігу процесів розміцнення [6]

Дислокаційні уявлення у різанні металів викладено у ряді робіт, наприклад, у [7, 16, 19]. Сучасні методи дослідження дислокаційної структури виконують за допомогою високовольтної електронної мікроскопії тонких фольг. Імпульсне фрезерування може мати інший вплив на оброблюваний метал, ніж безперервне фрезерування.

Так, ране було доказано що зі збільшенням швидкості, отже, і температури формується зливна стружка. Цьому сприяють дифузійні процеси на межах зерен, що полегшують поворот зерен та міжзеренну деформацію. При цьому ступінь пластичної деформації стружки знижується. При подальшому зростанні швидкості різання формування елементарної стружки пов'язане із запізненням 15 пластичних деформацій. [6]

Висновок. Побудова 2-х блочної установи відкриває широкі можливості для дослідження високошвидкісного імпульсного зубчастого фрезерування в широкому діапазоні вхідних параметрів, таких як швидкість обертання робочої фрези, швидкість подачі, частота імпульсів фрезерування. Точність вимірювання вихідних параметрів забезпечується синхронізацією еталонного і випробуваного двигунів за рахунок використання нейро-мерелінного контролера. Інтелектуальна система управління забезпечує повну синхронізацію електродвигунів.

Список використаних джерел

1. Гасанов М.І., Пермьяков О.А., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Охрименко О.А., Майборода В.С., Глушко В.С. Енергоефективність імпульсного швидкісного зубофрезерування з урахуванням атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (10) 2024. – С. 102–106. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).11.
2. Б.Л. Тишевич, Д.Д. Мугенов Інтелектуальна система управління швидкістю на базі нейронної мережі для електроприводів з синхронним двигуном з постійними магнітами // Електрифікація та автоматизація гірничих робіт Випуск №30 УДК 681.515+62-551.453
3. Обруч І. В. Керування нейронною мережею двомасової електромеханічної системи з розривом у кінематичних передачах // Збірник наукових праць, тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», т.1, Вісник НТУ «ХПІ», No 5, 2002, с. 1-11. 302 – 304.
4. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representation by back-propagating errors // Nature. – 1986. – vol. 323. – pp. 533 – 536.
5. De Jong K. A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective //In: Procs of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985. – pp. 167 – 177.
6. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02.
7. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.G. Gruppyv'e marshrutny'e tekhnologicheskije procesy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitacionogo modelirovaniya s uchetoм progressiruyushhikh vidov iznosa // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zб.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
8. Я. Кириленко, Б. Воробйов, С. Сенченко, Ю. Кутувий, Лю Хань Розробка системи керування тягового асинхронного електроприводу на основі нейромережі // Технічні науки та технології №3(33) 2023 DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-198-204
9. 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.
10. 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>.
11. Полонський, Л. Г., Клочко, О. О., Охрименко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, (1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
12. Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24 –25.
13. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковоротний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079–004X.
14. Клочко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079–004X.
15. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
16. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1–11
17. Нежебовський В.В., Дергоусов В.М., Пермьяков О.А., Клочко О.О., Устиненко О.В., Рябченко С.В.

Новітні процеси обробки зубчастих коліс редукторів вугледобувних комбайнів // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 162– 163. – ISBN 978-617-7889-20-4..

18. Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Ключко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укр200-500 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.

19. 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.

20. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.

References (transliterated):

1. Hasanov M.I., Permiakov O.A., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Okhrymenko O.A., Maiboroda V.S., Hlushko V.S. Enerhoefektyvnist impulsnoho shvydkisnoho zubofrezeruvannia z urakhuvanniam atomnoho pidkhdou // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: 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», 2024. № 2 (10) 2024. – S. 102–106. – ISSN 2079-004Kh, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).11.

2. B.L. Tyshevych, D.D. Muhenov Intelektualna systema upravlinnia shvydkistiu na bazi neuronnoi merezhi dlia elektropryvodiv z synkhrnym dvyhunom z postiinymy mahnitamy // Elektryfikatsiia ta avtomatyzatsiia hirnychkykh robit Vypusk №30 UDK 681.515+62-551.453

3. Obruch I. V. Keruvannia neuronnoiu merezheiu dvomasovoi elektromekhanichnoi systemy z rozryvom u kinematychnykh peredachakh // Zbirnyk naukovykh prats, tematychnyi vypusk «Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka», t.1, Visnyk NTU «KhPI», No 5, 2002, s. 1-11. 302 – 304.

4. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representation by back-propagating errors // *Nature*. – 1986. – vol. 323. – pp. 533 – 536.

5. De Jong K. A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective //In: *Procs of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms*, 1985. – pp. 167 – 177.

6. Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuvanni zahartovanykh tsylindrycheksykh zubchatykh kolis na osnovi atomnoho pidkhdou // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: 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. – № 1 (5) 2022. – S. 10–20. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02.

7. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.Г. Gruppyv`e marshrutny`e tekhnologicheskije procsy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitaczionogo modelirovaniya s uchetom progressiruyushhikh vidov iznosa // *Nadi`jni st` i`nstrumentu ta optimi`zacii`ya tekhnologi`chnik sistem: зб.наук. пр. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.*

8. Ia. Kyrylenko, B. Vorobiov, S. Senchenko, Yu. Kutovyi, Liu Khan Rozrobka systemy keruvannia tiahovoho asynkhrnnoho elektropryvodu na osnovi neiromerezhi // *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii №3(33) 2023* DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-198-204

9. 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.

10. Klochko, O., Okhrymenko, 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>.

11. Polonskyi, L. H., Klochko, O. O., Okhrymenko, O. A., Betsko, Yu. M., Koval, B. H., & Khraban, D. V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profilu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system. *Tekhnichna inzheneriia*, (1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)

12. Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnoho abrazyvnoho zubofrezeruvannia tsylindrychnykh zubchastykh kolis // *Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovy-tekhnichnoho seminaru*, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24 –25.

13. Hasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Iu., Perminov Ye.V. Tekhnolohichni rehlement optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velykohabarytnykh vidkrytykh zubchatykh peredach // *Visnyk*

Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Natsionalnyi tekhnichniy universytet «Kharkivskiy politekhnichniy instytut». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. – № 6 (1282) 2018. – S. 107–112. – ISSN 2079-004Kh.

14. Klochko A.A., Hasanov M.Y., Basova E.V. Rehlament vybora y naznacheniya parametrov sostoianiya poverkhnostnoho sloia zakalennykh zubchatykh koles. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnologii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 33 (1205). – S. 145–157. – Biblyohr.: 7 nazv. – ISSN 2079-004Kh.

15. Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuvanni zahartovanykh tsylindrycheskyykh zubchatykh kolis na osnovi atomnnoho pidkhidu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5) 2022. – S. 10–20. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02

16. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, ASME J. Tribol. 139 (2017) 021402–1–11

17. Nezhebovskiy V.V., Derhousov V.M., Permiakov O.A., Klochko O.O., Ustynenko O.V., Riabchenko S.V. Novitni protsesy obrobky zubchastykh kolis reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 01 – 03 veresnia 2022 roku / za zah. red. V. D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2022. – S. 162–163. – ISBN 978-617-7889-20-4.

18. Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustynenko O.V. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu ukd200-500 novoho pokolinnia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 7–15. – ISSN 2079-004Kh, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

19. 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.

20. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. Tehnicki Vjesnik, 25(2), 643-648.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

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

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

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

Гасанов Магомедемін Ісагомедович (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, ORCID:0000-0002-2161-2386

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

Глушко Станіслав Сергійович (Stanislav Hlushko) – аспірант кафедри Інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел: +380967871482 e-mail: glushko1979@ukr.net, ORCID: 0i009-0006-2459-2153;

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

МИРОНЕНКО С. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОВЗАННЯ МІЖ ЗУБАМИ 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 ковзання між зубами 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 увігнутих, а також опукло-увігнутих. Показано, що неевольвентні зубчасті зачеплення можуть мати менші коефіцієнти ковзання в точках торкання профілів в порівнянні з евольвентними зачепленнями. Найбільш доцільним представляється варіант рейок з опуклим і увігнутих 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 SLIP COEFFICIENTS BETWEEN TEETH 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 slip 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 convex-concave – were performed. It is shown that non-evolvent gearing can have smaller slip coefficients at the points of tangency of the profiles compared to evolvent gearing. The most preferable is the variant of the rails with convex and concave 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.

У сучасному машинобудуванні до зубчастих передач пред'являються високі вимоги. Вони 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.

На стадії проектування зубчастих передач їх найважливіші експлуатаційні властивості (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.

Найбільш поширеними механічними передачами, які застосовуються в машинобудуванні, є зубчасті передачі з евольвентним профілем бічних поверхонь зубів. Передачі, складені з таких коліс, відрізняються рядом переваг, однак мають при цьому і цілий ряд недоліків. 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 зубчастими передачами за якісними показниками.

Мета дослідження.

Дослідження спрямовані на комплексний аналіз якісних показників неевольвентних зубчастих зачеплень, зокрема розробку математичної моделі розрахунку коефіцієнтів ковзання між зубами 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.

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 формоутворення 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 ковзання між зубами 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. Відповідно до кінематичної умови, проекції швидкостей контактуючих точок обох ланок на загальну нормаль повинні бути однакові.

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 φ_1 і φ_2 , параметри їх швидкостей ω_1 і ω_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 три послідовні моменти торкання профілів зубів у точках L , 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 деякою кривою, що проходить через полюс зачеплення.

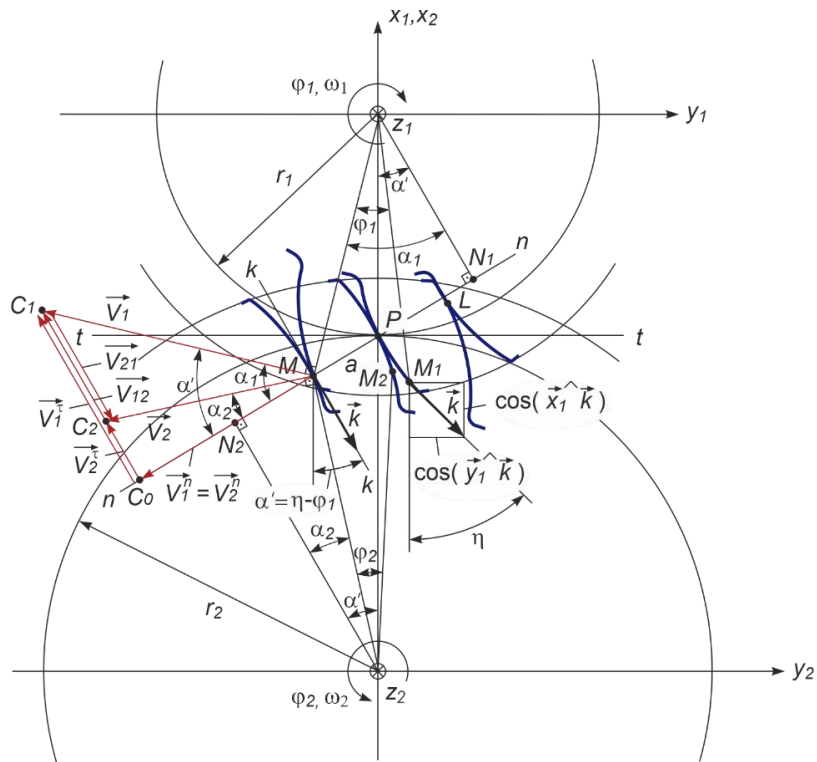


Рис. 1 - До розрахунку коефіцієнтів ковзання між зубами зубчастої передачі

Лінія $t-t$ – загальна дотична до центроїд у точці P . Прямая $n-n$, 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 α' . У загальному випадку, коли профілі зубів неевольвентні, значення кута α' різні для різних точок торкання профілів і не збігаються зі значенням кута α , що відповідає торканню профілів у полюсі зачеплення P .

Відстань MP між точкою торкання профілів M та полюсом зачеплення P , виміряне за профільною нормаллю, позначимо як a . Точки перетину загальної нормалі до профілів $n-n$ та перпендикулярів, опущених на нормаль з точок центрів центроїд коліс O_1 і O_2 , позначимо як N_1 і N_2 .

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 .

У процесі зачеплення профілів зубів спостерігається як ковчання профілю по профілю, а й їх ковчання друг по другу. Під час руху точок M_1 і M_2 до точки контакту M вони проходять різні шляхи M_1M і M_2M . Водночас дуга M_1P профілю зуба колеса 1 переміщається по дузі M_2P профілю зуба колеса 2, але довжини цих дуг не рівні. Внаслідок цього ковчання профілів супроводжується ковчанням.

Для оцінки взаємного ковчання профілів зубів користуються поняттям питомого ковчання зубів. Під питомим ковчанням розуміється відношення швидкостей ковчання профілів V_{12} і V_{21} у точці їх контакту до тангенціальних складових V_1^t і V_2^t швидкостей точок контакту (тобто до проєкцій цих швидкостей на загальну дотичну до профілів) [8]. Тоді коефіцієнти питомого ковчання в точках контакту профілів зубів зубчастих коліс 1 і 2 можна визначити за формулами:

$$\lambda_1 = \frac{V_{12}}{V_1^t}; \lambda_2 = \frac{V_{21}}{V_2^t}. \quad (1)$$

Для визначення швидкостей V_{12} і V_{21} , а також тангенціальних складових V_1^t і V_2^t швидкостей точок контакту сполучених профілів побудуємо план швидкостей зубчастого зачеплення, прийнявши за полюс плану швидкостей точку M . Умовою існування вищої кінематичної пари є умова нерозривності контакту ланок, що полягає в тому, що проєкції швидкостей ланок у точці контакту на контактну нормаль до профілів мають бути рівними. З точки M перпендикулярно до відрізків O_1M і O_2M проведемо вектори \vec{V}_1 і \vec{V}_2 швидкостей руху точок профілів зубів зубчастих коліс 1 і 2 такої довжини, щоб їх проєкції на загальну нормаль до профілів \vec{V}_1^n і \vec{V}_2^n збігалися. Вектори швидкостей ковчання \vec{V}_{12} і \vec{V}_{21} визначаються з плану швидкостей як вектори, пропорційні відріzkу C_1C_2 , де точки C_1 і C_2 – кінці векторів \vec{V}_1 і \vec{V}_2 . Вектори тангенціальних складових швидкостей точок контакту \vec{V}_1^t і \vec{V}_2^t пропорційні відріzkам C_0C_1 і C_0C_2 , де точка C_0 – кінець векторів \vec{V}_1^n і \vec{V}_2^n , що збігаються. Відносний рух зубчастих коліс 1 і 2 можливий у напрямку загальної дотичної до профілів у точці дотику $\kappa-\kappa$. Цей рух характеризується векторами швидкостей ковчання профілів \vec{V}_{12} і \vec{V}_{21} у точці їх контакту, які, як видно з плану швидкостей (рис. 1), можна визначити як різниці проєкцій швидкостей точок контакту \vec{V}_1 і \vec{V}_2 або як різниці проєкцій швидкостей точок контакту на загальну дотичну до профілів (різниці тангенціальних складових цих швидкостей) \vec{V}_1^t і \vec{V}_2^t :

$$\begin{aligned} \vec{V}_{12} &= \vec{V}_1 - \vec{V}_2 = \vec{V}_1^t - \vec{V}_2^t; \\ \vec{V}_{21} &= \vec{V}_2 - \vec{V}_1 = \vec{V}_2^t - \vec{V}_1^t. \end{aligned} \quad (2)$$

Для визначення співвідношення швидкостей у передачі розглянемо трикутник MC_1C_0 , утворений векторами швидкостей \vec{V}_1 , \vec{V}_1^t , \vec{V}_1^n , і трикутник O_1MN_1 (рис. 1). Із подібності цих трикутників запишемо таке співвідношення:

$$\frac{V_1}{O_1M} = \frac{V_1^t}{MN_1} = \frac{V_1^n}{O_1N_1}. \quad (3)$$

Тоді з рівняння (3) з урахуванням того, що відношення $\frac{V_1}{O_1M} = \omega_1$, тобто дорівнює кутовій швидкості обертання зубчастого колеса 1, отримаємо вираз для тангенціальної складової вектору швидкості точки контакту на зубчастому колесі 1:

$$V_1^r = \omega_1 \cdot N_1M. \quad (4)$$

Із подібності трикутника MC_2C_0 , утвореного векторами швидкостей \vec{V}_2 , \vec{V}_2^r , \vec{V}_2^n , і трикутника O_2MN_2 , запишемо співвідношення:

$$\frac{V_2}{O_2M} = \frac{V_2^r}{MN_2} = \frac{V_2^n}{O_2N_2}. \quad (5)$$

Із рівняння (5) з урахуванням того, що відношення $\frac{V_2}{O_2M} = \omega_2$, тобто дорівнює кутовій швидкості обертання зубчастого колеса 2, отримуємо вираз для тангенціальної складової вектору швидкості точки контакту на зубчастому колесі 2:

$$V_2^r = \omega_2 \cdot N_2M. \quad (6)$$

Тоді вираз для швидкості ковзання V_{12} можна записати у вигляді:

$$V_{12} = V_1^r - V_2^r = \omega_1 \cdot N_1M - \omega_2 \cdot N_2M = \omega_1 \cdot (N_1P + PM) - \omega_2 \cdot (N_2P - PM) = (\omega_1 + \omega_2) \cdot PM + (\omega_1 \cdot N_1P - \omega_2 \cdot N_2P). \quad (7)$$

Доведемо, що у співвідношенні (7) вираз у останніх дужках дорівнює нулю. Для зубчастих коліс 1 і 2 параметри обертань φ_1 і φ_2 , а також параметри їх швидкостей ω_1 і ω_2 пов'язані між собою залежностями:

$$\varphi_1 = i \cdot \varphi_2, \quad \omega_1 = i \cdot \omega_2, \quad (8)$$

де i – передатне відношення зубчастої передачі, яке можна визначити через відношення радіусів центрів або відношення кількостей зубів зубчастих коліс наступним чином:

$$i = \frac{r_2}{r_1} = \frac{z_2}{z_1}. \quad (9)$$

Із подібності трикутників N_1O_1P і N_2O_2P запишемо співвідношення:

$$\frac{N_1O_1}{N_2O_2} = \frac{O_1P}{O_2P} = \frac{N_1P}{N_2P}. \quad (10)$$

Оскільки $O_1P = r_1$; $O_2P = r_2$, використовуючи залежності (8) і (9), можна записати вираз:

$$\frac{O_1P}{O_2P} = \frac{N_1P}{N_2P} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{i} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (11)$$

Звідси випливає, що $\omega_1 \cdot N_1P = \omega_2 \cdot N_2P$ та вираз (7) для швидкості ковзання V_{12} можна переписати в наступному вигляді:

$$V_{12} = V_1^r - V_2^r = (\omega_1 + \omega_2) \cdot PM. \quad (12)$$

Тоді вираз для швидкості ковзання V_{21} запишеться наступним чином:

$$V_{21} = V_2^r - V_1^r = -(\omega_1 + \omega_2) \cdot PM. \quad (13)$$

Як показують формули (12) і (13), швидкість ковзання в точках контакту профілів зубів 1 і 2 дорівнює добутку швидкості відносного обертання зубчастих коліс та відстані PM між точкою торкання профілів M та полюсом зачеплення P .

При суміщенні точки контакту з полюсом зачеплення відстань $PM = 0$, а значить швидкість ковзання $V_{12} = V_{21} = 0$, профілі зубів обкатуються без ковзання та має місце лише їхнє перекочування. В цьому випадку передача руху від одного зубчастого колеса до іншого відбувається за рахунок сил тертя, що виникають у зоні контакту і забезпечують перекочування профілів без їхнього відносного ковзання.

Якщо ж точка контакту профілів не збігається з полюсом зачеплення, то передача руху відбувається

шляхом тиску одного профілю зуба на інший з їх відносним ковзанням. При цьому початкові окружності зубчастих коліс (центроїди з радіусами r_1 і r_2) обкатуються одна відносно іншої без ковзання [8].

Підставивши співвідношення (12), (13), (4) і (6) у формули (1), отримуємо вирази для визначення коефіцієнтів питомого ковзання в точках контакту профілів зубів зубчастих коліс 1 і 2:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{(\omega_1 + \omega_2) \cdot PM}{\omega_1 \cdot N_1 M} = \frac{(\omega_1 + \omega_2) \cdot PM}{\omega_1 \cdot (N_1 P + PM)} = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \frac{PM}{(N_1 P + PM)}; \\ \lambda_2 &= \frac{-(\omega_1 + \omega_2) \cdot PM}{\omega_2 \cdot N_2 M} = \frac{-(\omega_1 + \omega_2) \cdot PM}{\omega_2 \cdot (N_2 P - PM)} = (1+i) \frac{-PM}{(N_2 P - PM)}.\end{aligned}\quad (14)$$

Як показують формули (14), абсолютні значення коефіцієнтів питомого ковзання зростають зі збільшенням відстані PM між точкою торкання профілів M і полюсом зачеплення P , а також при зменшенні відстаней $N_1 P$ і $N_2 P$, що залежать від геометричних параметрів зубчастої передачі. При суміщенні точки контакту з полюсом зачеплення відстань $PM = 0$, коефіцієнти ковзання $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$.

При підрахунку λ_1 і λ_2 необхідно мати на увазі, що якщо зубчасті колеса 1 і 2 мають різну кількість зубів z_1 і z_2 , то за час повного обороту колеса з меншою кількістю зубів колесо з більшою кількістю зубів не встигає здійснити повний оборот, його зуби в i раз рідше вступають у контакт в порівнянні з зубами меншого колеса та, як наслідок, менше зношуються. Отже, щоб порівняти інтенсивність зносу зубів коліс за коефіцієнтом питомого ковзання, при підрахунку коефіцієнтів ковзання необхідно помножити чи розділити λ_1 або λ_2 на величину i .

У тому випадку, коли більшим зубчастим колесом є колесо 1, тобто $z_1 > z_2$, коефіцієнти питомого ковзання в точках профілів зубів визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\lambda_1' &= \lambda_1 \cdot i = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \cdot i \frac{PM}{(N_1 P + PM)} = (1+i) \frac{PM}{(N_1 P + PM)}; \\ \lambda_2' &= \lambda_2 = (1+i) \frac{-PM}{(N_2 P - PM)}.\end{aligned}\quad (15)$$

Якщо ж більшим зубчастим колесом є колесо 2, тобто $z_2 > z_1$, формули для визначення коефіцієнтів питомого ковзання мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\lambda_1' &= \lambda_1 = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \frac{PM}{(N_1 P + PM)}; \\ \lambda_2' &= \frac{\lambda_2}{i} = \frac{1+i}{i} \frac{-PM}{(N_2 P - PM)} = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \frac{-PM}{(N_2 P - PM)}.\end{aligned}\quad (16)$$

У процесі зачеплення точка контакту профілів рухається вздовж лінії зачеплення у напрямку від точки входу зубів у зачеплення до точки виходу зубів із зачеплення. Вирази (15) і (16) справедливі для моментів торкання профілів у точках, подібних до точки M , що відповідає контакту точки M_1 профілю головки зуба зубчастого колеса 1 і точки M_2 профілю ніжки зуба зубчастого колеса 2. Для моментів торкання профілів у точках, подібних до точки L (рис. 1), що відповідає контакту точки профілю ніжки зуба зубчастого колеса 1 і точки профілю головки зуба зубчастого колеса 2, у вирази (15) і (16) необхідно ввести корективи, змінивши знаки перед усіма входженнями у вирази відстані PM .

З урахуванням того, що $PM = a$; $N_1 P = r_1 \cdot \sin \alpha'$; $N_2 P = r_2 \cdot \sin \alpha'$, отримуємо остаточні вирази для визначення коефіцієнтів питомого ковзання в точках контакту профілів зубів зубчастих коліс 1 і 2:

для випадку $z_1 > z_2$

$$\begin{aligned}\lambda_1' &= (1+i) \frac{\pm a}{(r_1 \cdot \sin \alpha' \pm a)}; \\ \lambda_2' &= (1+i) \frac{\mp a}{(r_2 \cdot \sin \alpha' \mp a)};\end{aligned}\quad (17)$$

для випадку $z_2 > z_1$

$$\begin{aligned}\lambda_1' &= \left(1 + \frac{1}{i}\right) \frac{\pm a}{(r_1 \cdot \sin \alpha' \pm a)}; \\ \lambda_2' &= \left(1 + \frac{1}{i}\right) \frac{\mp a}{(r_1 \cdot \sin \alpha' \mp a)},\end{aligned}\quad (18)$$

при цьому знак перед змінною a залежить від розташування точок торкання на профілях: верхній із знаків « \pm » або « \mp » перед змінною a необхідно використовувати при розрахунку коефіцієнтів ковзання для моментів торкання профілів у точках, подібних до точки M , а нижній – у разі розрахунку для моментів торкання профілів у точках, подібних до точки L .

Для знаходження значень параметрів α' і a скористаємося 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 η . 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 φ_1 і φ_2 відповідно. До відомої вихідної інформації також відносяться значення кутів торкання профілів φ_2 для різних точок [2]. Параметри рухів пов'язані між собою відповідно до залежностей (8) і (9).

Із рис. 1 видно, що у момент торкання профілів у точці M значення кута α' можна визначити як різницю кута нахилу дотичної до профілю η і кута повороту φ_1 зубчастого колеса 1. Отже, для будь-якої точки торкання профілів буде справедливе співвідношення:

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

Значення $a = PM$ можна визначити, обчисливши координати точок M і P , а потім довжину відрізка PM у перерізі x_1y_1 .

Точка M утворюється поворотом вихідної точки M_1 на кут φ_1 навколо осі z_1 (див. рис. 1). В перерізі x_1y_1 точка M_1 має відомі координати x_1 і y_1 . Тоді координати точки M у цьому перерізі можна визначити з наступних залежностей:

$$\begin{aligned}x_1^M &= x_1 \cdot \cos \varphi_1 - y_1 \cdot \sin \varphi_1; \\ y_1^M &= x_1 \cdot \sin \varphi_1 + y_1 \cdot \cos \varphi_1.\end{aligned}\quad (20)$$

Координати точки P в перерізі x_1y_1 дорівнюють:

$$\begin{aligned}x_1^P &= -r_1; \\ y_1^P &= 0.\end{aligned}\quad (21)$$

Довжина відрізка PM обчислюється наступним чином:

$$MP = \sqrt{(x_1^M - x_1^P)^2 + (y_1^M - y_1^P)^2}. \quad (22)$$

З урахуванням залежностей (8), (9), (20) і (21) отримаємо формулу для обчислення величини a у будь-якій точці торкання профілів:

$$a = \sqrt{\left(x_1 \cdot \cos\left(\varphi_2 \frac{r_2}{r_1}\right) - y_1 \cdot \sin\left(\varphi_2 \frac{r_2}{r_1}\right) + r_1\right)^2 + \left(x_1 \cdot \sin\left(\varphi_2 \frac{r_2}{r_1}\right) + y_1 \cdot \cos\left(\varphi_2 \frac{r_2}{r_1}\right)\right)^2} \quad (23)$$

Обчисливши значення α' і a за формулами (19) і (23), за формулами (17) і (18) можна визначити значення коефіцієнтів питомого ковзання в точках контакту профілів зубів зубчастих коліс 1 і 2.

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

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

Комп'ютерну програму LinesModel призначено для геометричного моделювання плоских кінематичних кривих як потенційних профілів бічних поверхонь зубів зуборізних інструментів для виготовлення невольвентних 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 формоутворення 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 формоутворення невольвентних зубчастих передач на основі кінематичного аналізу їх руху методами теорії відображень простору [11, 6].

Вікно програми Gears для вибору або введення вихідних даних наведено на рис. 2. 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 ковзання між зубами зубчастих зачеплень, утворених рейками з різним профілем бічних поверхонь зубів. На рис. 3-5 наведено приклади зачеплення профілів бічних поверхонь зубів зубчастих коліс з модулем $m = 5$ мм і кількостями зубів $z_1 = 20$ і $z_2 = 30$, утворених інструментальної рейкою з прямолінійним профілем, інструментальними рейками 1 і 2 з увігнутим і опуклим профілями, а також інструментальними рейками 1 і 2 з увігнуто-опуклими профілями зубів відповідно. У першому випадку профілі зубів зубчастих коліс – евольвентні.

На рис. 3-5 також представлено графіки з чисельними значеннями коефіцієнтів ковзання в точках торкання профілів зубів зубчастих коліс (n – номери точок профілів зубів). У представлених прикладах в зубчастих зачепленнях, утворених рейкою з прямолінійним профілем зубів, середні значення коефіцієнтів ковзання між зубами зубчастої передачі становлять $\lambda_{1\text{ серед}} = 0.871$, $\lambda_{2\text{ серед}} = 0.425$; в зубчастих зачепленнях, утворених рейками 1 і 2 з увігнутим і опуклим профілями зубів – $\lambda_{1\text{ серед}} = 0.320$, $\lambda_{2\text{ серед}} = 0.306$, в зубчастих зачепленнях, утворених рейками 1 і 2 з увігнуто-опуклими профілями зубів – $\lambda_{1\text{ серед}} = 0.476$, $\lambda_{2\text{ серед}} = 0.289$. Отже, для невольвентних зубчастих зачеплень коефіцієнти ковзання менші в середньому в 2.1 і в 1.7 рази, ніж в евольвентному зачепленні.

Висновки.

Для комплексного аналізу якісних показників невольвентних зубчастих зачеплень розроблено математичну модель розрахунку коефіцієнтів ковзання між зубами зубчастої передачі. Виконано аналіз коефіцієнтів ковзання між зубами зубчастих зачеплень, утворених рейками з різним профілем бічних поверхонь зубів. Результати чисельних експериментів показують, що невольвентні зубчасті зачеплення можуть мати менші коефіцієнти ковзання в точках торкання профілів 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.

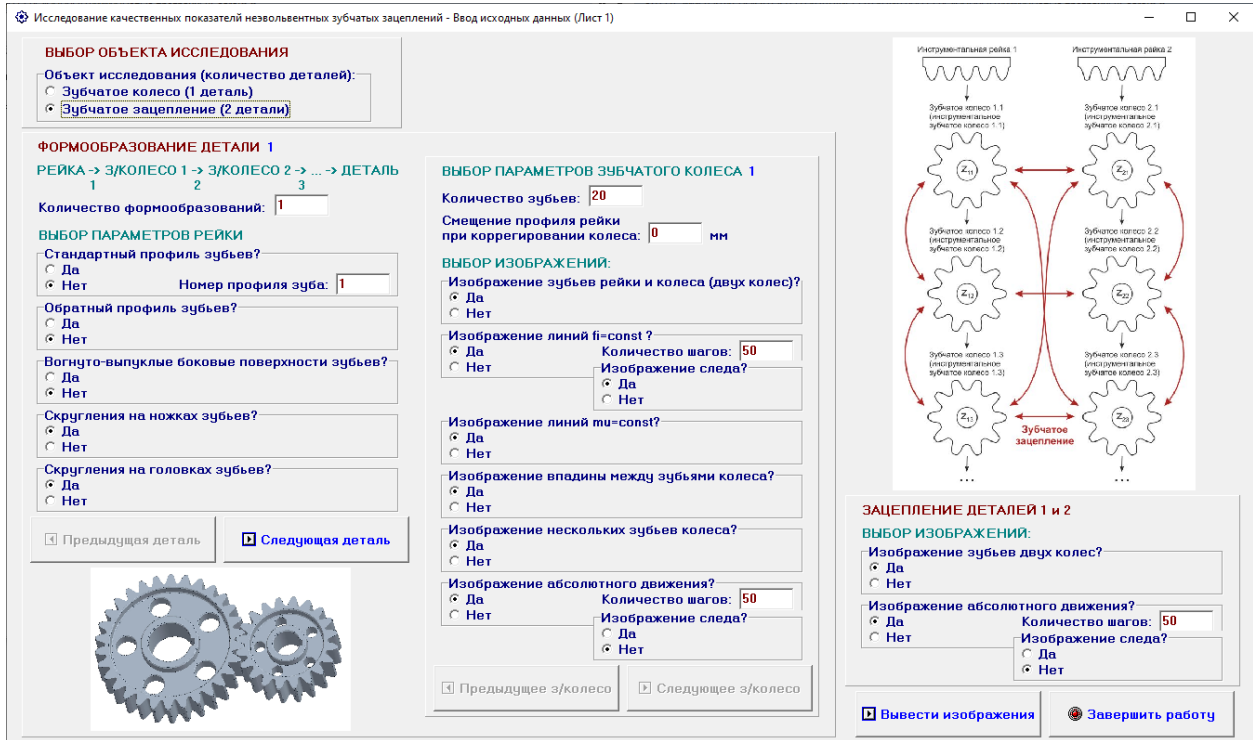


Рис. 2 – Вікно програми Gears для вибору або введення вихідних даних

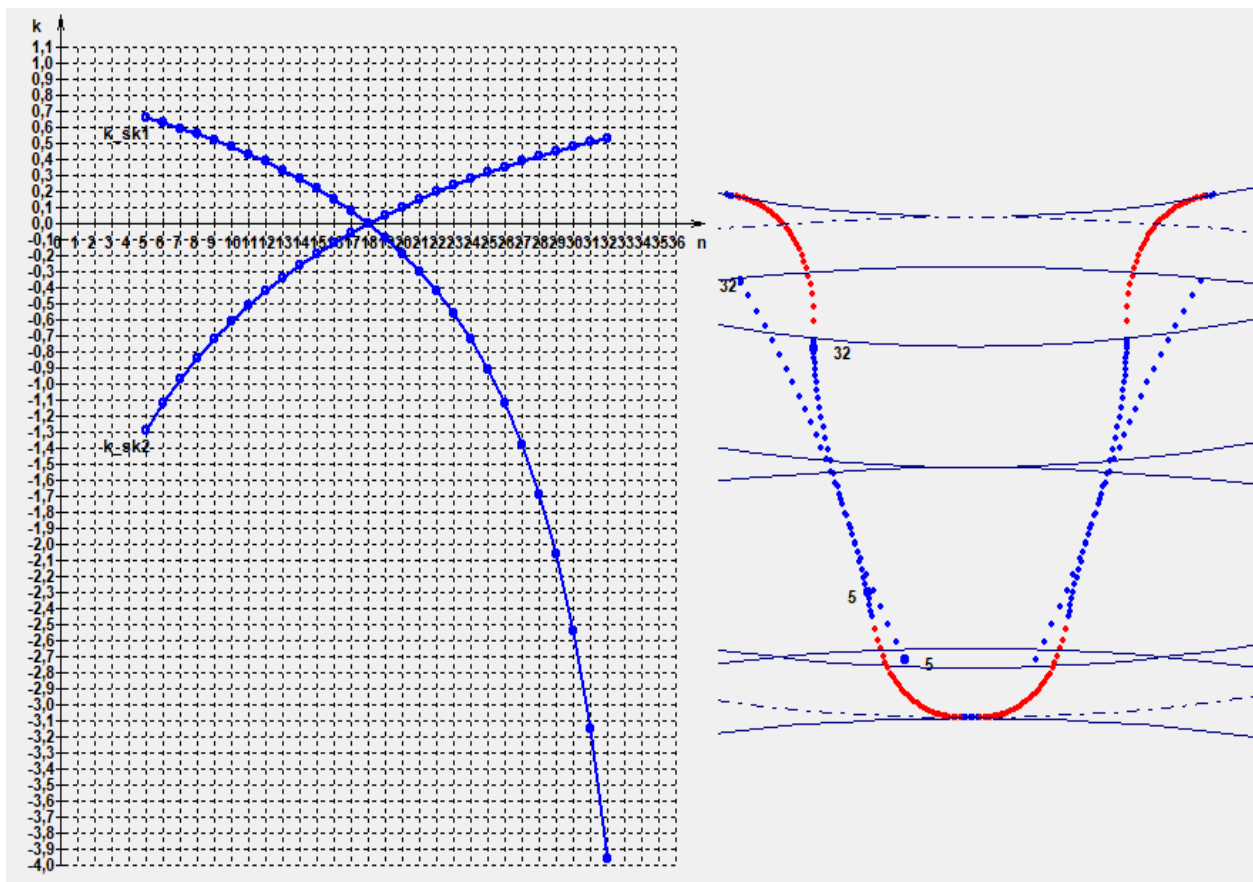


Рис. 3 – Зачеплення профілів бічних поверхонь зубів зубчастих коліс з $m = 5$ мм, $z_1 = 20$ і $z_2 = 30$, утворених інструментальною рейкою з прямолінійним профілем зубів та графіки коефіцієнтів ковзання в точках торкання профілів зубів зубчастих коліс

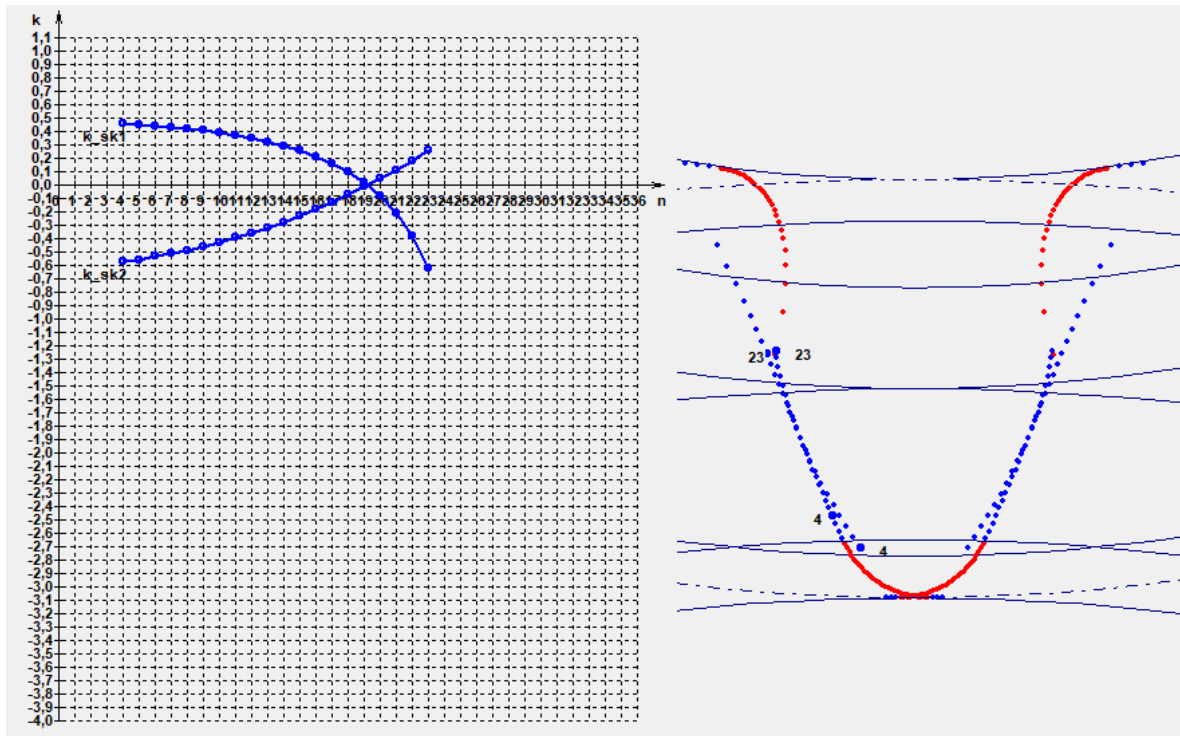


Рис. 4 – Зачеплення профілів бічних поверхонь зубів зубчастих коліс з $m = 5$ мм, $z_1 = 20$ і $z_2 = 30$, утворених інструментальними рейками 1 і 2 з увігнутим і опуклим профілями зубів та графіки коефіцієнтів ковзання в точках торкання профілів зубів зубчастих коліс

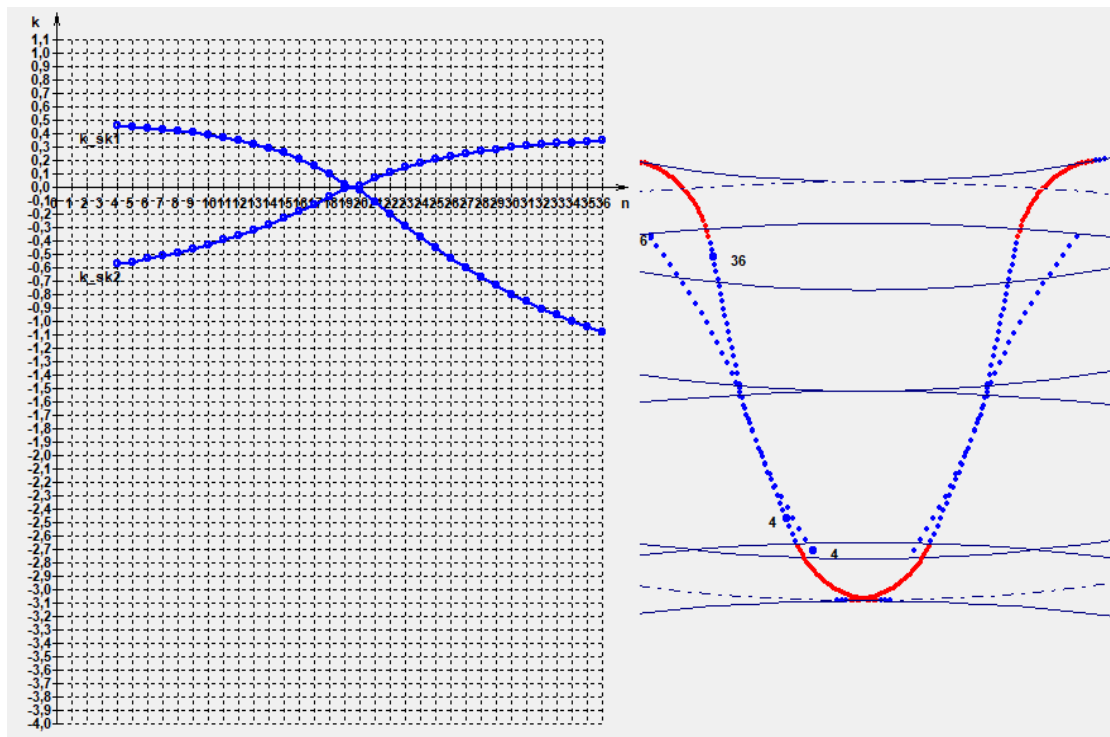


Рис. 5 – Зачеплення профілів бічних поверхонь зубів зубчастих коліс з $m = 5$ мм, $z_1 = 20$ і $z_2 = 30$, утворених інструментальними рейками 1 і 2 з увігнуто-опуклими профілями зубів та графіки коефіцієнтів ковзання в точках торкання профілів зубів зубчастих коліс

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 Brăncuși», Târgu Jiu. Pp. 7-11.
2. Tretyak Tatyana, Shelkovoy 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 Shelkovoi, 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 Brăncuși», 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 «ХПИ», 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. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учебник для вузов. М.: Наука, 1988. 640 с.
9. Заблонский К.И., Белоконов И.М., Щекин Б.М. Теория механизмов и машин: Учебник. К.: Вища школа, 1989. 376 с.
10. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. 584с.
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, Shelkovoy 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., Shelkovej A.N., Gucalenko Yu.G., Mironenko A.L., Mironenko S.A. Matematicheskoe modelirovanie profilya zuboreznogo obkatochnogo instrumenta dlya obrabotki neevolventnyh zubchatyh kolos. «Visnik Donbaskoyi derzhavnoyi mashinobudivnoyi akademiyi»: Zb. nauk. prac. Kramatorsk: DDMA, 2019. № 3 (47). 230 s. S. 121-129.
4. Tatyana Tretyak, Yury Gutsalenko, Alexander Shelkovoi, 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 kachestvennyh pokazatelej zubchatyh peredach so slozhnym neevolventnym profilem bokovyh poverhnostej zubev. Visnik Nacionalnogo Tehnichnogo Universitetu «Harkivskij Politehniknij Institut». Zbirk naukovih prac. Seriya: Dinamika i micnist mashin. Harkiv: NTU «HPI». 2020. № 2. 85 s. S. 85-90.
6. Tretyak T.E., Shelkovej A.N., Gucalenko Yu.G., Mironenko S.A. Analiz kachestvennyh pokazatelej neevolventnyh zubchatyh 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. Artobolevskij I.I. Teoriya mehanizmov i mashin: Uchebnik dlya vtuzov. M.: Nauka, 1988. 640 s.
9. Zablonkij K.I., Belokonev I.M., Shekin B.M. Teoriya mehanizmov i mashin: Uchebnik. K.: Visha shkola, 1989. 376 s.
10. Litvin F.L. Teoriya zubchatyh zaceplenij. M.: Nauka, 1968. 584s.
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, optimizaciya, diagnostika: Tezisy dokl. Harkov: HGPU, 1995. S. 71.
13. Komp'yuterna programa «Geometricheskoe modelirovanie kinematicheskikh krivyh» («LinesModel») / Tretyak T.Ye., Shelkovij O.M., Mironenko O.L., Mironenko S.O. Svidoctvo pro reyestraciyu avtorskogo prava na tvir № 118397 vid 24 kvitnya 2023 r.
14. Komp'yuterna programa «Issledovanie kachestvennyh pokazatelej neevolventnyh zubchatyh zaceplenij» («Gears») / Tretyak T.Ye., Shelkovij O.M., Mironenko O.L., Mironenko S.O. Svidoctvo pro reyestraciyu avtorskogo prava na tvir № 117622 vid 28 bereznya 2023 r.

Надійшла (received) 21.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мironenko 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.

*ФАДЕЄВ А.В.***ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕВЕРСИВНОГО ІНЖИНІРИНГУ**

У статті розглянуто концепцію технологічного забезпечення процесів відновлення деталей із застосуванням цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу. Показано, що традиційні підходи до ремонту та відновлення не забезпечують необхідної точності та ефективності в умовах сучасних вимог до ресурсу та надійності виробів. Запропоновано поєднання технологій 3D-сканування, CAD/CAE/CAM-систем, цифрового моделювання та аналітичних методів для створення єдиного цифрового середовища відновлення. Основна увага приділена інтеграції цифрового двійника з процесом реверсивного реінжинірингу, що дає можливість формувати адаптивні технологічні маршрути ремонту деталей, прогнозувати залишковий ресурс та оцінювати працездатність виробів. Наукова новизна роботи полягає у розробленні концептуальної схеми технологічного забезпечення відновлення деталей, яка враховує індивідуальні умови експлуатації, зношування та конструктивні особливості виробу. Практична значущість дослідження полягає у скороченні термінів підготовки виробництва, зниженні собівартості ремонтних процесів та підвищенні точності відновлення геометрії деталей.

Ключові слова: концепція, відновлення, цифрові двійники, поєднання технологій, надійність виробів, цифрове моделювання.

FADEEV A.**TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE RESTORATION OF PARTS USING REVERSE ENGINEERING**

The article considers the concept of technological support for parts' restoration processes using digital twins and reverse reengineering. It is shown that traditional approaches to repair and restoration do not provide the necessary accuracy and efficiency in the conditions of modern requirements for the resource and reliability of products. A combination of 3D scanning technologies, CAD/CAE/CAM systems, digital modeling and analytical methods is proposed to create a single digital restoration environment. The main attention is paid to the integration of the digital twin with the reverse reengineering process, which makes it possible to form adaptive technological routes for the repair of parts, predict the residual resource and assess the performance of products. The scientific novelty of the work lies in the development of a conceptual scheme for the technological support of the restoration of parts, which takes into account individual operating conditions, wear and design features of the product. The practical significance of the study lies in reducing the time for preparing production, reducing the cost of repair processes and increasing the accuracy of restoring the geometry of parts

Keywords: concept, restoration, digital twins, combination of technologies, product reliability, digital modeling

Постановка проблеми. Доцільність відновлення деталей зумовлена можливістю повторного використання більшості деталей. Собівартість відновлення деталей звичайно не перевищує вартості нових тому, що витрати на матеріал нижчі, але у разі значного пошкодження деталі існуючі методи ремонту можуть не мати економічних переваг у порівнянні з виготовленням нової. Вибір раціонального способу відновлення зношених або пошкоджених деталей є актуальною проблемою сучасного машинобудівного виробництва тісно пов'язаною із досягненнями і рівнем розвитку інтегрованих та комп'ютерних технологій в машинобудуванні. Реверсивний інжиніринг або зворотне проектування як сучасний процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком дозволяє у більшості випадків ефективно вирішувати виробничі завдання відновлення пошкоджених деталей, в першу чергу він дозволяє суттєво скоротити час на виготовлення деталей на заміну зношених або втрачених, а за необхідністю дозволяє виробляти їх серійно. За весь період розвитку технології машинобудування як науки розроблено, впроваджено й описано загальні принципи та рекомендації, методологію й методики проектування технологічних процесів виготовлення та складання машин з урахуванням усього різноманіття типів виробництв, видів організації виробничих процесів, галузевої особливості тощо. Без відповідних програмних та технічних засобів реверсивний інжиніринг існувати не може. У теперішній час існує величезна кількість програмних засобів та різноманітного високоточного обладнання, що забезпечує проведення всіх видів контролю деталей на виробництві. Для цього потрібно вирішити наступні задачі: уточнити і доповнити структуру життєвого циклу виробу, в першу чергу для етапів, що забезпечують продовження термінів служби деталей на основі реверсивного інжинірингу; розробити загальну схему і структуру технологічного та інформаційного забезпечення при технологічній підготовці виробництва з відновлення зношених або пошкоджених деталей з використанням різних методів адитивного та субтрактивного виробництва, що забезпечують його ефективність; на основі встановлення системних відмінностей між схемами технологічного процесу виготовлення і відновлення деталі запропонувати нові рішення з метрологічного забезпечення шляхом впровадження сучасних методів та засобів контрольних операцій.

Мета дослідження. На підставі системного аналізу та узагальнення досягнень технології машинобудування та ремонтного виробництва запропонувати концепцію технологічного забезпечення відновлення деталей при реверсивному інжинірингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням технологічного забезпечення відновлення деталей при реверсивному інжинірингу присвячено досить велика кількість наукових публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів. У роботах вітчизняних авторів досліджено стан, динаміку та тенденції наданням послуг у галузі технічного обслуговування, ремонту та відновлення машин підприємств, що займаються [1-9].

© А.В. Фадєєв. 2025

Визначено характер та особливості відмов, що призводять до втрати здатності машини виконувати своє функціональне призначення. Виділено основні методи організації ремонтних робіт, які визначають принципи організації підприємства з ремонту та технічного обслуговування. Розглянуто особливості розвитку сфери технічного обслуговування та ремонту у різних економічних регіонах, у тому числі України. Проаналізовано статистичні дані функціонування підприємств технічного обслуговування та ремонту за останні 15 років, виявлено основні закономірності їх зміни, визначено основні фактори, що вплинули на цей процес. Встановлено, що основна частка виконуваних робіт припадає на промислове обладнання, транспортні засоби, будівельну та сільськогосподарську техніку.

У зарубіжних публікаціях досліджуються різні питання технологічного забезпечення процесів відновлення деталей. [10-16]. Значну увагу приділено проблемам застосування лазерного наплавлення (powder laser cladding) для відновлення інструментальної оснастки (сталь 40HM) в авіаційному виробництві як альтернативу хромуванню. Практичний інтерес представляють уніфіковані моделі активу (asset model) для створення цифрових двійників у задачах розумного відновлення та ремануфактурингу, описується структура цифрового двійника. Окрему увагу приділено питанням управління життєвим циклом продукту, що має принципове значення у виборі термінів та методів у процесах відновлення деталей, допомагає компаніям оптимізувати виробничі процеси, скоротити час виходу на ринок і підвищити якість продукції. Безумовне теоретичне і практичне значення для визначення напрямів дослідження мають питання впливу штучного інтелекту, великих баз даних, хмарних технологій, цифрових платформ та взагалі процесів діджиталізації на вибір технологій відновлення деталей. Документ NASA/технічний звіт з глибокою експериментальною оцінкою LP-DED для тонких мікроканалних елементів та гермік-сценаріїв; охоплює моніторинг процесу, оптимізацію параметрів і приклади відновлення [15]. У дослідженні DED для відновлення/з'єднання різномірних матеріалів (316L ↔ IN718) із використанням filler-матеріалу CoCrFeNi оцінено межі сумісності та мікроструктурні явища. Незважаючи на велику увагу дослідників різних країн до проблеми технологічного забезпечення процесів відновлення деталей, подальшої розробки потребують методологічні питання вибору методів та технологій, а також застосування цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу у цих процесах.

Викладення основного матеріалу. Реверсивний реінжиніринг — це сукупність методів і процесів, спрямованих на відтворення конструкції, геометрії, матеріальних і функціональних властивостей існуючої (зазвичай вже виготовленої або зношеної) деталі чи вузла, коли початкової (проектної) документації немає або вона застаріла/неповна [1,2]. Мета реверсивного реінжинірингу — отримати повноцінну цифрову модель (геометрію та властивості), на основі якої можна: відтворити деталь (виробництво, модернізація), провести аналіз (наприклад, міцнісний, температурний), розробити технологію відновлення (ремонт, наплавлення, адитив). Реверсивний інжиніринг (RE) у сфері відновлення деталей включає комплекс технологій, що дозволяють отримати цифрову копію виробу, проаналізувати її та виготовити відновлений або модернізований аналог. Основні підходи можна поділити на три групи.

Група 1. 3D-сканування. Тут відомі такі методи, як лазерне сканування, структуроване світло, фотограмметрія. Їх застосування спрямовано на отримання хмар точок, що описують геометрію зношеної або пошкодженої деталі. Переваги цих методів полягають у швидкості збору даних, високій деталізації та можливості аналізу зносу. Обмеження стосуються складності сканування внутрішніх поверхонь, залежність від оптичних властивостей матеріалів.

Група 2. CAD-моделювання. Ця група методів вирішує задачі перетворення хмар точок у поверхневі або твердотільні моделі (SolidWorks, CATIA, NX). Вони дозволяють створювати параметричні моделі деталей для подальшого відновлення або модифікації. Їх задачі полягають у забезпеченні інтеграції з САМ/САЕ системами та оптимізації конструкції. Ці технології передбачають значні витрати часу на побудову складних поверхонь та для них характерний людський фактор при моделюванні.

Група 3. Цифрові двійники (Digital Twins). Методи: інтеграція 3D-моделей з даними датчиків, симуляцій та експлуатаційних характеристик. Ця група технологій застосовується для прогнозування зносу, оптимізації процесів ремонту, вибору оптимальної технології відновлення. Їх переваги у підвищенні точності прогнозування та можливості «віртуального тестування» до фактичного відновлення. Використання цих методів потребує великі масиви даних та для них характерна складність побудови мультифізичних моделей.

Процеси MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) — це комплекс робіт з технічного обслуговування, ремонту та відновлення обладнання, техніки або систем для забезпечення їхньої працездатності та безпеки. Це охоплює профілактичні, коригувальні, прогнозні дії, а також капітальні ремонти, що проводяться для запобігання поломкам, усунення несправностей та продовження терміну служби складних об'єктів в авіації, транспорті та промисловості. Основні складові MRO: технічне обслуговування, ремонт, відновлення. Сфери застосування: авіація, транспорт, промисловість та оборонна промисловість.

Попри технічній та економічній доцільності відновлення та значному прогресу їх використання, існуючі технології реверсивного інжинірингу та відновлення мають ряд проблем, які гальмують їх масове впровадження. По-перше-це проблеми точності: похибки при 3D-скануванні (особливо для відблискуючих або дрібних елементів), спотворення геометрії при переході від хмари точок до CAD-моделі та неповне відтворення

матеріальних властивостей у цифрових двійниках. По-друге-собівартість. Для технологій реверсійного інжинірингу характерні висока вартість промислових 3D-сканерів і програмного забезпечення, значні енергетичні витрати при використанні адитивних методів ремонту та необхідність висококваліфікованих фахівців (CAD/CAE/AM). По-третє, це проблеми ресурсу: надійність і довговічність відновлених деталей. У деяких випадках ресурс відновленої деталі не досягає ресурсу нової. Є проблеми з адгезією матеріалів при наплавленні чи адитивному відновленні. Недостатня стандартизація та відсутність уніфікованих методик випробувань.

Таким чином, систематизація підходів дозволяє чітко розмежувати інструменти реверсивного інжинірингу, а аналіз проблематики підкреслює необхідність підвищення точності цифрових моделей, зниження вартості технологій та стандартизацію процесів оцінки ресурсу відновлених деталей.

Традиційно процес відновлення деталей виглядав так: *зношена деталь* → *вимірювання* → *креслення/модель* → *відновлювальні технології (наплавлення, напилення, механічна обробка)* → *контроль*.

Запропонована концепція технологічного забезпечення процесів відновлення деталей із застосуванням цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу з використанням цифрових двійників змінює цей підхід. Зношена деталь стає базою для побудови цифрового двійника – 3D-моделі з урахуванням фактичного зносу, дефектів, геометричних і фізико-механічних характеристик. Реверсивний реінжиніринг забезпечує відтворення не лише геометрії, а й функціональних параметрів (наприклад, розподілу навантажень, теплових впливів, вібрацій). Цифровий двійник інтегрується в CAD/CAM/CAE-системи та дозволяє симулювати роботу відновленої деталі ще до її фізичного виготовлення; підібрати оптимальну технологію відновлення (наплавлення, 3D-друк, гібридна обробка) та прогнозувати ресурс та надійність після ремонту.

Таким чином, процес стає цифрово-замкнутим циклом: *деталь - цифровий двійник - цифрова перевірка - відновлення - нова верифікація - експлуатація - корекція моделі*.

Визначимо основні положення цієї концепції. До ключових складових концепції слід віднести оцифрування (сканування), обробку даних (точкова хмара - сітка - CAD), ідентифікацію матеріалу/стану, створення цифрового двійника і подальше рішення задач - від проектування до виробництва/відновлення.

Пропонуєма авторами концепція технологічного забезпечення відновлення деталей - це інтегрований цикл, де цифровий двійник (DD) є центральним елементом, що зв'язує фізичну деталь, процес її діагностики і рішення про відновлення. Цифровий двійник зношеної деталі - не просто CAD-копія геометрії, а багаторівнева модель, що включає:

- *геометричний двійник (точна 3D-геометрія)*, фізичний/матеріальний шар (матеріальні властивості, гістограми твердості, мікроструктура), поведінковий шар (моделі напружень, теплові моделі, умови навантаження), історичні дані (цифровий паспорт: цикли навантажень, ремонти, експлуатаційні умови);

- *цифрову нитку (digital thread)* — автоматизований потік даних між сканером → CAD → CAE → CAM → MES/Підприємством: вся інформація від діагностики до кінцевої валідації зберігається, версіонується й використовується для ухвалення рішень;

- *інтелектуальне рішення про технологію відновлення* — система (експертна/машинне навчання + фізичні моделі), що на вході має цифровий двійник та критерії (витрати, ресурс, точність) і на виході дає оптимальний план ремонту (метод, параметри процесу, маршрут обробки);

- *гібридні технологічні ланцюги* — поєднання адитивних методів (лазерне наплавлення, DED) з традиційною мехобробкою і термообробкою для відновлення форми й властивостей;

- *контроль якості в цифровому полі* — симуляції (кількісний прогноз залишкового ресурсу), моделі похибок, план випробувань та автоматизовані інспекції після відновлення (3D-скан → порівняння з цифровим цільовим профілем).

Механізми застосування цифрових двійників — це технологічна архітектура, яка полягає у наступному (рис.1).

Розкриємо сутність цих механізмів.

1. Джерела даних (input):

- 3D-сканування поверхні (лазерні сканери, structured light, фотограмметрія);
- КТ / рентгенографія для внутрішніх дефектів;
- Ультразвукове сканування (UT) для виявлення внутрішніх тріщин;
- СММ (координатні вимірювальні машини) — для критичних допусків;
- Сенсори (температура, вібрація, strain gauges) при експлуатації — для онлайн-оновлення DD;
- Хімічний аналіз (EDS, OES) / мікроструктурний аналіз для визначення матеріалу.

2. Обробка і інтеграція даних:

- побудова точкової хмари → фільтрація шуму → вирівнювання (registration) → реконструкція поверхні (mesh) → перетворення в параметричну CAD-модель (NURBS, B-ger);
- витягнення конструктивних особливостей (feature recognition) або створення параметричного шаблону;
- віднесення матеріальних даних до геометрії (map of hardness, корозія, товщина стінок).

3. Моделі й симуляції (CAE):

- статичний/динамічний аналіз навантажень, термодинамічні моделі, моделі втоми, моделювання процесів адитивного наплавлення (теплові / залишкові напруження);

-в використання методів data-assimilation для калібрування моделей під фактичні NDT-дані (наприклад, Калманівські фільтри, баєсовські оновлення, physics-informed ML).

4. Інтеграція з виробництвом:

- CAM (план наплавлення / траєкторії інструменту) → CNC / DED машина → post-processing (механічна обробка, термообробка);

- MES/PLM для версіювання, управління матеріалами й цифрового паспорта.

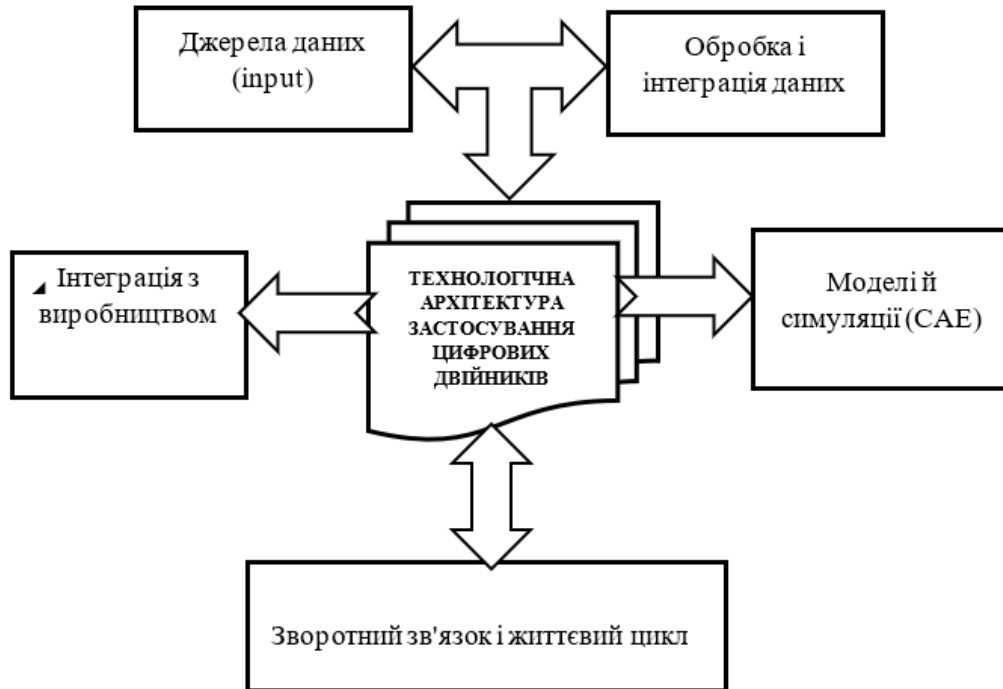


Рис. 1 - Механізми застосування цифрових двійників. Узагальнено автором.

5. Зворотний зв'язок і життєвий цикл:

- після відновлення — інспекція (3D-скан), порівняння з DD, внесення корекцій до процесів, оновлення цифрового паспорта.

Розглянемо як працює реверсивний реінжиніринг у покроковому робочому процесі.

Крок 1. Підготовка та діагностика:

- а) візуальний огляд, визначення ключових зон зносу/пошкодження;
- б) вибір методів NDT (УТ, рентген/КТ, магнітний контроль для феромагнітних деталей);
- в) вибір експлуатаційних даних (якщо є).

Крок 2. Оцифрування геометрії:

- виконати 3D-сканування (поверхня); для внутрішніх дефектів — КТ;
- зібрати точкову хмару; забезпечити достатню щільність і точність для критичних зон.

Крок 3. Обробка даних / реконструкція:

- видалення шуму, вирівнювання, сегментація зон (зона корозії, зона зносу);
- побудова сітки (mesh), переклад у CAD (NURBS/B-гер), створення параметричної моделі.

Крок 4. Ідентифікація матеріалу і стану:

- хімічний аналіз, твердоміри, аналіз мікроструктури;
- оцінка властивостей (модуль пружності, межа текучості, залишкова міцність).

Крок 5. Аналіз і прийняття рішення:

- CAE — перевірити, чи можлива відновлювана геометрія забезпечить необхідний ресурс під заданими навантаженнями

- мультикритеріальний аналіз: витрати, час, ресурс, ризик і екологія.

Крок 6. Проектування ремонту:

- план покриття/наплавлення, товщина наплавлення, технологія (лазер, плазма, порошкова DED, холодне відновлення);

- розробка траєкторії, підготовка оснастки, фіксація деталі.

Крок 7. Виконання технологічного процесу: адитивна наплавка/напилення → механічна обробка до допусків → термообробка/відпал → поверхневе зміцнення.

Крок 8. Контроль якості та валідація:

- 3D-інспекція (поверхня), NDT (внутрішні дефекти), механічні випробування зразків для підтвердження властивостей;

- порівняння факту з цифровим цільовим профілем.

Крок 9. Документування і оновлення цифрового паспорта : занесення в PLM/MES: всі параметри процесу, матеріали, звіти NDT, результати випробувань.

Розглянемо технології , які застосовуються для відновлення деталей.

Directed Energy Deposition (DED, лазерне/електронно-променево наплавлення) — точкові наплавки для металевих деталей; хороші для місцевих дефектів [1]. DED може означати прямий підвід енергії та матеріалу (*Directed Energy Deposition*) — технологію 3D-друку для створення або ремонту металевих деталей. Лазерне та електронно-променево наплавлення — це процеси нанесення захисного або відновлювального шару на поверхню виробу, що використовують високоенергетичні промені для плавлення та переплавлення порошку або напиленого покриття. Лазерне наплавлення використовує лазерний промінь, а електронно-променево — сфокусований потік високошвидкісних електронів у вакуумі. Обидва методи забезпечують високу точність, мінімальне нагрівання основи та покращені властивості покриття, але вимагають використання спеціалізованого обладнання.

Cold spray (холодне напилення) — для областей, де потрібна мінімальна термічна дія. [2]

Холодне напилення – це сукупність процесів нанесення покриттів, при яких частки матеріалу нагріваються до температури нижче точки плавлення, а потім розпилюються під дією зовнішньої сили, такої як газ, порошок, або електричний струм, і осідають на поверхні, утворюючи покриття. Основні принципи холодного напилення:

- низька температура: частинки матеріалу нагріваються лише до того, щоб пом'якшитись, а не до температури плавлення;

- кінетична енергія: основна енергія для формування покриття надходить від кінетичної енергії розпиленних частинок, які при зіткненні з поверхнею зварюються;

- відсутність фазових змін: на відміну від традиційного гарячого напилення, в холодному напиленні не відбувається розплавлення матеріалу та його перетворення в рідкий стан, що дозволяє зберігати початковий склад матеріалу;

- використання холодного напилення: відновлення деталей; холодне напилення використовується для відновлення зношених або пошкоджених деталей машин та механізмів; захист від корозії: нанесення антикорозійних покриттів для захисту металевих поверхонь від руйнування;

- збільшення зносостійкості: створення покриттів, які підвищують стійкість деталей до стирання та інших механічних навантажень;

- типи холодного напилення: газодинамічне напилення-застосування високошвидкісного потоку газу для розгону та доставки частинок до поверхні;

-плазмове напилення (з низькою потужністю): використання плазми для нагріву частинок до потрібної температури;

- електростатичне напилення: зарядження частинок та їх притягнення до поверхні завдяки електростатичним силам

WAAM / Wire-based AM — швидке наплавлення великих об'ємів металу. WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), або адитивне виробництво з використанням дрютяної дуги, це процес 3D-друку металом, при якому електрична дуга використовується для пошарового плавлення металевого дроту з метою створення тривимірних об'єктів. Ця технологія відноситься до сімейства процесів прямого енергетичного осадження (DED) і дозволяє створювати великі металеві деталі з високою швидкістю та низькими витратами, використовуючи роботизовані системи для точного управління процесом.

Опишемо як це працює.

1. Плавання дроту: роботизована рука подає металевий дріт до робочої зони.

2. Формування дуги: електрична дуга розплавляє дріт, утворюючи рідкий метал.

3. Пошарове осадження: розплавлений метал осідає на підкладці або попередньому шарі, поступово формуючи тривимірну структуру.

4. Контроль та захист: інертний газ використовується для запобігання окисленню та поліпшенню властивостей металу.

5. Створення об'єкта: процес повторюється, додаючи шар за шаром до отримання бажаної деталі або компонента.

Внаслідок цих операцій отримуються наступні основні характеристики.

Висока швидкість виробництва: WAAM має найвищу швидкість нанесення матеріалу серед процесів DED, що дозволяє швидко виготовляти великі конструкції.

Низька вартість матеріалів: використання металевого дроту як витратного матеріалу робить процес економічно вигіднішим.

Мінімізація відходів: технологія дозволяє робити деталі з високою точністю, наближеною до заданих форм, що скорочує втрати матеріалу.

Складність деталей: WAAM дозволяє створювати складні металеві деталі, які можуть бути недоступними традиційними методами.

Застосування: технологія знаходить застосування в аерокосмічній промисловості, будівництві (наприклад, 3D-друкарські мости) та виробництві великих металевих компонентів.

Аддитивне виробництво з використанням дрютяної дуги - це ефективна технологія аддитивного виробництва, що швидко розвивається, що поєднує в собі простоту традиційного зварювання з точністю автоматизованих систем для створення складних металевих виробів [3].

Плазмове та лазерне напилення — для зносостійких покриттів [4].

Плазмове та лазерне напилення – це сучасні технології нанесення зносостійких покриттів, що використовують енергію плазми або лазерного променя для розплавлення та нанесення матеріалу на поверхню деталі, формуючи щільний шар з високою твердістю та адгезією. Ці методи дозволяють ефективно відновлювати зношені деталі та надавати їм додатковий захист від корозії та зношування.

Плазмове напилення відрізняється тим, що низькотемпературна плазма розігріває матеріал (порошок або дріт) до високої температури, розплавляє його і прискорює до високої швидкості нанесення на поверхню деталі. Переваги цієї технології у тому, що вона формує щільний шар з мінімальною пористістю, забезпечує високу адгезію покриття до основи, дозволяє наносити покриття з різноманітних зносостійких матеріалів (метал, кераміка) та не деформує основний метал деталі.

Лазерне напилення (лазерне наплавлення) досягається завдяки тому, що лазерний промінь концентрує теплову енергію, яка дозволяє наносити тонкі, точні шари матеріалу. Переваги цієї технології у високій концентрації теплової потужності, що забезпечує мінімальну зону термічного впливу, можливості отримання тонких покриттів (від 0,1 мм до декількох міліметрів) та високій точності нанесення покриття.

Обидві технології широко застосовуються для відновлення зношених деталей (наприклад, відновлення клапанів, кулачків розподільчих валів; нанесення захисних покриттів (для захисту від корозії та механічного зношування); покращення характеристик поверхонь (надання деталям підвищеної твердості та зносостійкості).

Гібридні підходи створюються внаслідок використання адитивних операцій разом з механічною обробкою (фінішна обробка до допусків) [5]. Адитивні операції – це процеси виготовлення об'єктів шляхом послідовного накладання шарів матеріалу, що ґрунтуються на цифровій моделі. Цей підхід, відомий як адитивне виробництво, протиставляється традиційним методам, які видаляють матеріал (субтрактивні) або формують його з більшого об'єму (формувальні).

Основні принципи адитивних операцій: пошарове створення (тривимірний об'єкт будується шар за шаром, додаючи матеріал за потребою); цифрова модель (процес керується цифровою тривимірною моделлю, що надає точні дані для принтера); спеціалізоване обладнання (для адитивних операцій використовуються тривимірні принтери, які перетворюють цифрову модель на фізичний об'єкт). Ключові переваги: гнучкість (можливість створювати складні форми та деталі з декількох матеріалів за один процес); доступність (тривимірні принтери стають швидшими, доступнішими та простішими у використанні); інноваційність (дозволяє швидко розробляти та виготовляти прототипи та готові вироби, перетворюючи цифрові дизайни на реальні об'єкти).

Висновки. У статті обґрунтовано концепцію технологічного забезпечення відновлення деталей, засновану на інтеграції цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу, що забезпечує новий рівень якості й ефективності ремонтних процесів.

Використання цифрових двійників дозволяє прогнозувати працездатність виробів, визначати залишковий ресурс та формувати оптимальні технологічні маршрути відновлення.

Запропонований підхід сприяє зниженню витрат на ремонт на 20–30 % у порівнянні з традиційними методами та забезпечує підвищення точності геометричного відтворення деталей.

Реверсивний реінжиніринг у поєднанні з цифровим моделюванням створює передумови для розвитку адаптивних і гнучких виробничих систем у сфері відновлення деталей.

Перспективними напрямками подальших досліджень є автоматизація прийняття технологічних рішень із використанням штучного інтелекту та інтеграція розробленої концепції з сучасними системами управління життєвим циклом виробів (PLM).

Список літератури:

1. Пермяков О. А. Реверсивний інжиніринг зношених деталей як альтернатива процесів їх відновлення / Пермяков О. А., Яковенко І. Е. // Нові технології в машинобудуванні : матеріали тридцять третьої всеукр. конф., 4-7 вересня 2023, Харків, Україна : зб. наук. праць / Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ". – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – С. 48-50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>
2. Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі / І. Е. Яковенко [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – № 1 (11). – С. 89-97. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91809>

3. Використання портативних верстатів для ремонту і модернізації об'єктів важкого машинобудування / О. А. Пермяков, І. Е. Яковенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XX Міжнар. наук.-техн. конф., 01–03 верес. 2022 р. — Краматорськ-Тернопіль : ДДМА, 2022. — С. 174–176.
4. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну УКД200-500 нового покоління / В. В. Нежебовський, Р. А. Бережний, О. А. Пермяков, О. О. Клочко, С. В. Рябенко, О. В. Устиненко // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т» : зб. наук. пр. Серія : Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry. — Харків, 2022. — № 2 (6). — С. 7–15.
5. Сучасні методи обробки редукторів вугледобувних комбайнів / О. М. Ковальчук, В. В. Нежебовський, Р. А. Бережний, С. П. Біатов, О. А. Пермяков, О. О. Клочко, О. В. Устиненко, С. В. Рябенко // Інформатика, управління та штучний інтелект : тези 9-ї міжнар. наук.-техн. конф., Харків – Краматорськ, 11–13 трав. 2022 р. — С. 57.
6. Відновлення деталей методом плазмового напилення.URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennya>
7. Операнди і операції URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
8. Мочурад, Л. І., Осідач, А. Б. (2024). Паралельний метод RANSAC для потокового оброблення даних сенсорів LiDAR. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(3), 110-116. <https://doi.org/10.36930/40340314>
9. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В./ Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкцій. Національний університет “Львівська політехніка”. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Вип. 50. 2016 103 УДК 621.791.92 URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
10. Piotr Koruba et al., Feasibility of laser cladding for tooling repair in aerospace manufacturing: an alternative to chrome plating (прийнято 2024, опубл. 2024/2025). ResearchGate .URL: https://www.researchgate.net/publication/387174887_Feasibility_of_laser_cladding_for_tooling_repair_in_aerospace_manufacturing_an_alternative_to_chrome_plating?utm_source=chatgpt.com
11. W. Sun et al., Current Implementation Status of Cold Spray Technology — review (2022). PMC.URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8966869/?utm_source=chatgpt.com
12. J. Liang et al., Research on hybrid remanufacturing process chain of laser cladding + CNC machining + ultrasonic (2024). ScienceDirect URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523011647?utm_source=chatgpt.com
13. A. Kafle et al., Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing — Materials (MDPI), 2024/ URL: <https://www.mdpi.com/2079-9103/15/1/1007>
14. Fabrizia Caiazzo et al., Residual stress in laser-based directed energy deposition of aluminum alloy 2024: simulation and validation — IJAMT (2022)/URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07988-2?utm_source=chatgpt.com
15. Paul Gradl / NASA — Development and experimental evaluation of Laser Powder Directed Energy Deposition (LP-DED) (дисертаційний/технічний звіт, 2024/2025)/URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589152925000481?utm_source=chatgpt.com
16. R. Patel et al., Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: SS316L and IN718 case study (2025). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924646025000481>
17. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (дата звернення: 24.04.2025)
18. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (дата звернення: 24.04.2025)

References (transliterated):

1. Permiakov O. A. Reversyvnyi inzhynirnyh znoshenykh detalei yak alternatyva protsesiv yikh vidnovlennia / Permiakov O. A., Yakovenko I. E. // Novi tekhnolohii v mashynobuduvanni : materialy trydtsiat tretoi vseukr. konf., 4-7 veresnia 2023, Kharkiv, Ukraina : zb. nauk. prats / Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M. Ye. Zhukovskoho "KhAI". — Kharkiv : Vydavnytstvo Ivanchenka I. S., 2023. — S. 48-50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>
2. Perspektyvy rozvytku reversyvnoho inzhynirnyhu v mashynobudivnii haluzi / I. E. Yakovenko [ta in.] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seria: Tekhnolohii v mashynobuduvanni : zb. nauk. pr. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. — Kharkiv : NTU "KhPI", 2025. — № 1 (11). — S. 89-97. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91809>
3. Vykorystannia portatyvnykh verstativ dlia remontu i modernizatsii obiektiv vazhkoho mashynobuduvannia / O. A. Permiakov, I. E. Yakovenko // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku : materialy XX Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 01–03 veres. 2022 r. — Kramatorsk-Ternopil : DDMA, 2022. — S. 174–176.

4. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia / V. V. Nezhebovskiy, R. A. Bereznyi, O. A. Permiakov, O. O. Klochko, S. V. Riabchenko, O. V. Ustynenko // Visnyk Nats. tekhn. un-tu «Kharkiv. politekhn. in-t»: zb. nauk. pr. Seriya : Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry. — Kharkiv, 2022. — № 2 (6). — S. 7–15.
5. Suchasni metody obrobky reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv / O. M. Kovalchuk, V. V. Nezhebovskiy, R. A. Bereznyi, S. P. Biatov, O. A. Permiakov, O. O. Klochko, O. V. Ustynenko, S. V. Riabchenko // Informatyka, upravlinnia ta shtuchnyi intelekt : tezy 9-yi mizhnar. nauk.-tekhn. konf., Kharkiv – Kramatorsk, 11–13 trav. 2022 r. — S. 57.
6. Vidnovlennia detalei metodom plazmovoho napylennia.
URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennia>
7. Operandy i operatsii URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
8. Mochurad, L. I., Osidach, A. B. (2024). Paralelnyi metod RANSAC dlia potokovoho obroblennia danykh sensoriv LiDAR. Scientific Bulletin of UNFU, 34(3), 110-116. URL: <https://doi.org/10.36930/40340314>
9. Dziubyk A. R., Voitovych A. A., Dziubyk L. V./ Optymizatsiia tekhnologii naplavlennia znosostiikykh shariv na ploski elementy konstruktsii. Natsionalnyi universytet “Lvivska politekhnika”. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni. Vyp. 50. 2016 103 UDK 621.791.92
URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
10. Piotr Koruba et al., Feasibility of laser cladding for tooling repair in aerospace manufacturing: an alternative to chrome plating (pryiniato 2024, opubl. 2024/2025). ResearchGate .URL: https://www.researchgate.net/publication/387174887_Feasibility_of_laser_cladding_for_tooling_repair_in_aerospace_manufacturing_an_alternative_to_chrome_plating?utm_source=chatgpt.com
11. W. Sun et al., Current Implementation Status of Cold Spray Technology — review (2022). PMC. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8966869/?utm_source=chatgpt.com
12. J. Liang et al., Research on hybrid remanufacturing process chain of laser cladding + CNC machining + ultrasonic (2024). ScienceDirect URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523011647?utm_source=chatgpt.com
13. A. Kafle et al., Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing — Materials (MDPI), 2024/ URL: Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing: Process, Materials, Optimization, Applications, and Challenges
14. Fabrizia Caiazzo et al., Residual stress in laser-based directed energy deposition of aluminum alloy 2024: simulation and validation — IJAMT (2022)/URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07988-2?utm_source=chatgpt.com
15. Paul Gradl / NASA — Development and experimental evaluation of Laser Powder Directed Energy Deposition (LP-DED) (dysertatsiinyi/tekhnichnyi zvit, 2024/2025)/URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589152925000481?utm_source=chatgpt.com
16. R. Patel et al., Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: SS316L and IN718 case study (2025). URL: Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: A case study on SS316L and IN718 with CoCrFeNi-based fillers - ScienceDirect
17. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (data zvernennia: 24.04.2025)
18. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (data zvernennia: 24.04.2025)

Надійшла (received) 09.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Фадеев Андрій Валерійович (Andriy Fadeev) – докторант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: fan17@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8436-5173.

СТРЕЛЬЧУК Р. М., РЯБЕНКОВ І. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

У роботі представлено результати комплексного дослідження впливу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів на формування залишкових напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6 і його експлуатаційні характеристики. Методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що після електроерозійного шліфування рівень залишкових стискаючих напружень становить -3,8 ГПа, що істотно вище порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням (-1,2 ГПа). Виявлено, що розміри областей когерентного розсіювання після електроерозійного шліфування становлять 200 Å, що свідчить про меншу теплонапруженість процесу порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням (150 Å). Проведено стійкісні випробування ріжучих пластин під час точіння сірого чавуну СЧ20, оброблених різними методами шліфування. Встановлено кореляцію між величиною залишкових макронапружень стиснення та зносостійкістю інструмента. Експериментально доведено, що стійкість пластин після електроерозійного шліфування на 53% вища порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням, що пояснюється більш сприятливим напруженим станом поверхневого шару і меншою шорсткістю обробленої поверхні.

Ключові слов: електроерозійне алмазне шліфування, залишкові напруження, твердий сплав, зносостійкість, рентгеноструктурний аналіз, макронапруження, полярність електродів, стійкість інструменту, поверхневий шар, деформація, фазовий склад.

STRELCHUK R., RIABENKOV I.

REGULATION OF THERMAL PROCESSES DURING ELECTROEROSIVE GRINDING WITH VARIABLE ELECTRODE POLARITY

The paper presents the results of a comprehensive study of the effect of diamond EDM grinding with alternating electrode polarity on the formation of residual stresses in the surface layer of VK6 hard alloy and its performance characteristics. X-ray diffraction analysis has shown that after EDM grinding, the level of residual compressive stresses is -3.8 GPa, which is significantly higher than after diamond spark grinding (-1.2 GPa). It was found that the size of the coherent scattering regions after EDM grinding is 200 Å, which indicates a lower thermal stress of the process compared to diamond spark grinding (150 Å). Stability tests of cutting inserts during turning of grey cast iron СЧ20, processed by different grinding methods, were carried out. A correlation between the value of residual macro compressive stresses and tool wear resistance was established. It has been experimentally proven that the durability of the plates after EDM grinding is 53% higher compared to diamond spark grinding, which is explained by a more favourable stress state of the surface layer and lower roughness of the machined surface.

Keywords: electrical discharge diamond grinding, residual stresses, hard alloy, wear resistance, X-ray diffraction analysis, macrostresses, electrode polarity, tool life, surface layer, deformation, phase composition.

Вступ. Якість поверхневого шару різального інструменту, що формується в процесі шліфування, істотно впливає на його експлуатаційні характеристики. Особливий інтерес становить вивчення залишкових напружень, що виникають у поверхневому шарі після різних методів шліфувальної обробки. У сучасному машинобудуванні широко застосовують твердосплавні інструменти, які потребують ефективних методів заточування і відновлення ріжучих властивостей. Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів є перспективним методом обробки твердосплавного інструменту, проте вплив цього методу на формування залишкових напружень і зносостійкість інструменту досліджено недостатньо.

Існуючі методи електроерозійного алмазного оброблення не завжди забезпечують необхідні якісні показники за одночасного зниження питомої витрати алмазного інструменту та енерговитрат. Особливо актуальною є проблема формування сприятливого напруженого стану поверхневого шару твердосплавного інструменту, оскільки саме він багато в чому визначає експлуатаційну стійкість ріжучих пластин. При цьому важливо враховувати вплив різних технологічних чинників – теплового, силового та фазового – на формування залишкових напружень у процесі шліфування.

Метою цього дослідження є встановлення закономірностей формування залишкових напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6 під час електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів і визначення їхнього впливу на зносостійкість ріжучого інструменту. Це дасть змогу оптимізувати технологічні режими обробки для підвищення експлуатаційних характеристик твердосплавного інструменту. Якість поверхневого шару різального інструменту, що формується в процесі шліфування, істотно впливає на його експлуатаційні характеристики. Особливий інтерес становить вивчення залишкових напружень, що виникають у поверхневому шарі після різних методів шліфувальної обробки. Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів є перспективним методом обробки твердосплавного інструменту, проте вплив цього методу на формування залишкових напружень і зносостійкість інструменту досліджено недостатньо.

Аналіз основних досягнень та літератури. Залишкові напруження класифікуються на дві основні категорії: макроскопічні (напруження першого роду) та мікроскопічні (напруження другого роду). Макронапруження виникають у макрооб'ємах матеріалу та є результатом рівноваги сил у великих масштабах. Мікронапруження, навпаки, формуються між окремими кристалітами або їх групами, а також між різними

© Р.М. Стрельчук, І.О. Рябенков. 2025

фазами матеріалу. Ці напруження можуть мати різний характер і впливати на властивості матеріалу на різних рівнях. Під час шліфування поверхня матеріалу піддається інтенсивному нагріву через тертя. Це призводить до

локального розширення матеріалу, а після охолодження – до утворення залишкових напружень розтягу. Теплові напруження можуть значно впливати на міцність матеріалу, особливо якщо він схильний до утворення тріщин при термічних навантаженнях [1].

Механічне вплив шліфувального інструменту на поверхню матеріалу призводить до пластичної деформації поверхневого шару. Ця деформація сприяє утворенню залишкових напружень стиску. На відміну від теплових напружень, стискуючі напруження можуть покращувати міцність матеріалу, зокрема його стійкість до мікросколювання. Під час шліфування можуть відбуватися фазові перетворення в поверхневому шарі матеріалу, що призводить до зміни його об'єму [2]. Ці зміни також є джерелом залишкових напружень. Однак вплив фазових перетворень на знак і величину напружень залишається неоднозначним і залежить від конкретних умов обробки та властивостей матеріалу.

Залишкові напруження можуть як покращувати, так і погіршувати експлуатаційні характеристики матеріалів, залежно від їх знака та величини. Наприклад, стискуючі напруження підвищують стійкість матеріалу до утворення тріщин і мікросколювання, що особливо важливо для крихких матеріалів, які працюють в умовах знакозмінних навантажень. З іншого боку, напруження розтягу можуть значно знижувати втомустійкість матеріалу, що призводить до передчасного руйнування деталей. У випадку твердих сплавів, таких як ВК6 (сплав на основі карбиду вольфраму та кобальту), залишкові напруження можуть впливати на їх зносостійкість. Більшість дослідників сходяться на думці, що стискуючі напруження покращують зносостійкість інструментів, тоді як значні напруження будь-якого знаку можуть призводити до збільшення зносу. Це пов'язано з тим, що в твердих сплавах, які є гетерофазними матеріалами, формуються як макронапруження, так і мікронапруження між фазами, що ускладнює прогнозування їх впливу на зносостійкість.

Електроерозійне алмазне шліфування є одним із методів обробки твердих сплавів, який відрізняється від традиційного шліфування використанням електричних розрядів для видалення матеріалу. Цей метод дозволяє досягти високої точності обробки та зберегти рельєф ріжучої поверхні інструменту. Однак електроерозійне алмазне шліфування також супроводжується утворенням залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу [3]. Особливістю електроерозійного алмазного шліфування є зміна полярності електродів у зоні різання, що впливає на тепловий та силовий фактори формування залишкових напружень. У порівнянні з алмазно-іскровим шліфуванням, електроерозійне алмазне шліфування характеризується меншою теплонапруженістю, що дозволяє припустити більший вплив силового фактора на формування залишкових напружень. Це може призводити до переважного утворення стискуючих напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6.

Методика дослідження. Стан поверхневого шару вивчався в твердосплавних пластинах ВК6 у вихідному стані після спікання та полірування, після електроерозійного та алмазно-іскрового шліфування за таких умов: на заточувальному верстаті моделі 3Д642Е застосовували торцеву схему шліфування, що здійснювали чашковими кругами конічної форми 12А2-45° 150×10×3×32 на зв'язці М1-01 з алмазними зернами АС6, зернистістю 100/80 і концентрацією - 4. Режими обробки: нормальний тиск $P_n=1,2$ МПа, швидкість круга $V=25$ м/с, амплітуда імпульсу розрядного струму $I=8$ А, частота проходження імпульсів $f=44$ КГц. Модельні зразки піддавалися рентгенівському дослідженню на дифрактометрі ДРОН 2.0 у фільтрованому випромінюванні залізного анода. Дифрактограми реєструвалися поточково через 0,1° з експозицією в кожній точці 10". Розмір областей когерентного розсіювання оцінювали за розширенням ліній за формулою Селякова-Шеррера. Аналіз напруженого стану проводився за допомогою $\sin^2\psi$ –методу. Для зйомок було обрано максимальну лінію за різного кута 2θ . Для кожного зразка було проведено перпендикулярну зйомку та похилі зйомки за $\psi=\pm 30^\circ$ і $\pm 50^\circ$. Рівень залишкових напружень визначали за формулою [4]:

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_\perp} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (1)$$

де d_\perp – міжплощинні відстані, виміряні під кутом і по нормалі до поверхні зразка; ψ – кут між нормою до поверхні зразка і відповідною нормою до площин, що відбивають.

У розрахунках прийнято макроскопічні значення пружних постійних: $E=720$ ГПа, $\mu=0,18$. Для характеристики стану поверхневого шару проводили якісний фазовий аналіз, оцінювали розмір областей когерентного розсіювання і рівень (величина і знак) залишкових макронапруг. На рис. 1–3 наведено дифрактограми досліджуваних зразків твердого сплаву ВК6 за різних станів.

За розширенням дифракційних ліній на малих кутах за формулою Селякова-Шеррера [5] визначали розміри областей когерентного розсіювання (рис.4):

$$L_{\text{окр}} = \frac{\lambda}{b \cos \Theta} \quad (2)$$

Для дослідження впливу способів шліфування на зносостійкість різального інструменту проведено стійкісні випробування твердосплавних пластин марки ВК6. Експерименти проводили на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 під час точіння без охолодження сірого чавуну марки СЧ20 (НВ180), розміри заготовки $d = 45$ мм, $l = 200$ мм за таких режимів: $V = 100$ м/хв, $S = 0,075$ мм/об, $t = 0,8$ мм. Різці мали такі геометричні параметри: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ$. За критерій затуплення було прийнято знос по задній поверхні $h_3 = 0,4$ мм, який вимірювали безпосередньо на верстаті за допомогою мікроскопа "Мир – 2

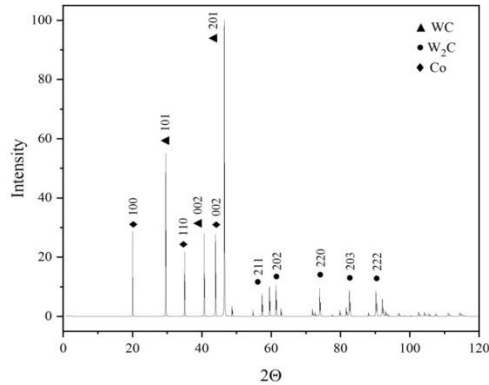


Рис. 1 – Дифрактограма вихідного стану твердого сплаву ВК6

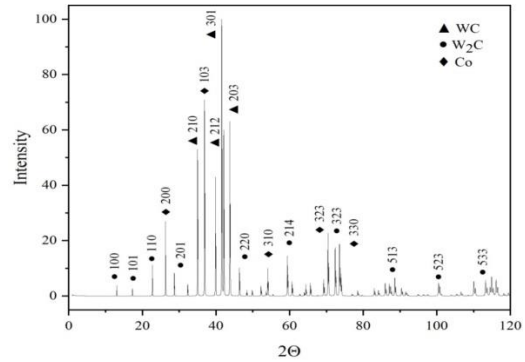


Рис. 2 – Дифрактограма стану твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового шліфування

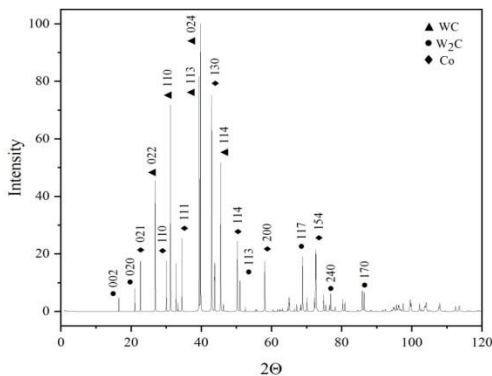


Рис. 3 – Дифрактограма стану твердого сплаву ВК6 після електроерозійного алмазного шліфування

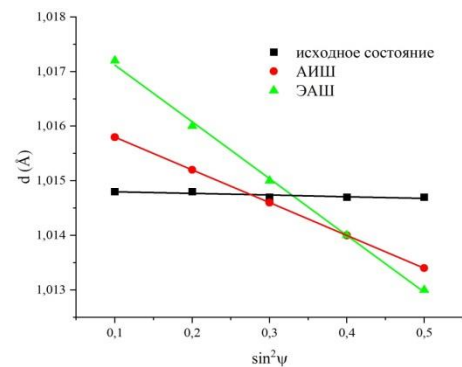


Рис.4 – $\sin^2\psi$ - графіки модельних зразків твердого сплаву ВК6

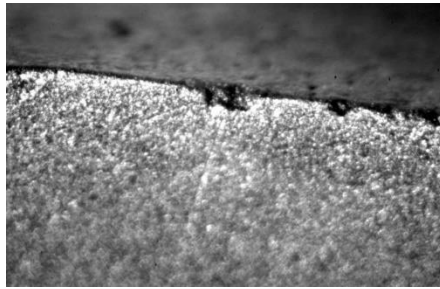
Результати. У результаті розрахунків виявилось, що максимальний розмір області когерентного розсіювання (ОКР) характерний для вихідного зразка твердого сплаву ВК6 – 600 Å, після алмазно-іскрового шліфування розмір ОКР істотно менший – 150 Å, а після електроерозійного алмазного шліфування дещо збільшуються і становить 200 Å. На рис.4 наведені $\sin^2\psi$ – графіки досліджених модельних зразків твердого сплаву. Представлені графіки дають змогу оцінити рівень деформації, а також знак і величину залишкових макронапружень. У результаті розрахунків, виявилось, що найбільші розміри областей когерентного розсіювання характерні для вихідного зразка твердого сплаву ВК6 – 600 Å, після алмазно-іскрового шліфування розміри ОКР істотно менші – 150 Å, а після електроерозійного алмазного шліфування дещо збільшуються і становлять 200 Å.

На рис. 4 наведені $\sin^2\psi$ – графіки досліджених модельних зразків твердого сплаву. Представлені графіки дають змогу оцінити рівень деформації, а також знак і величину залишкових макронапружень. Для вихідного зразка $\sin^2\psi$ – графік являє собою практично пряму лінію паралельну осі $\sin^2\psi$, що свідчить про відсутність макронапруг у дослідженому зразку після спікання. Ті невеликі деформації ($\epsilon = 0,002$ мм) і залишкові стискаючі макронапруження ($\sigma = -0,22$ ГПа) мабуть, викликані поліруванням. Після електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, виявлені деформації істотно вищі за ($\epsilon = 0,036$ мм), оцінка рівня залишкових стискаючих напружень дає значення $\sigma = -3,8$ ГПа. У зразку після алмазно-іскрового шліфування деформація ($\epsilon = 0,012$), а $\sigma = -1,2$ ГПа. Зниження рівня залишкових макронапруг під час алмазно-іскрового шліфування можна пояснити вищим рівнем температур, що розвиваються в зоні різання. Про це

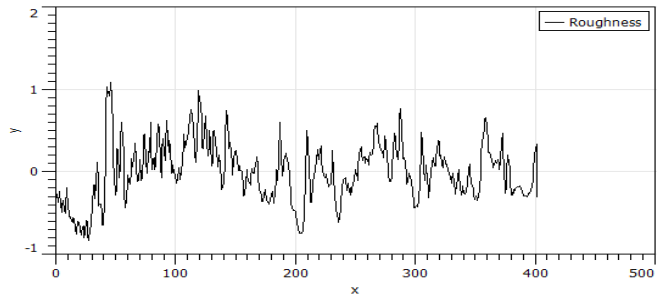
свідчить і збільшення розмірів ОКР. Також інтенсифікація режимів обробки спочатку спричиняє зростання величини стискаючої залишкової деформації, а потім - зниження. Це свідчить про взаємодію двох чинників - силового і теплового - з переважанням силового, що формує стискаючу деформацію [6].

Слід припустити, що залишкові напруження в поверхневому шарі пластин і стійкість цих пластин для ріжучого інструменту мають бути взаємопов'язані, тому були проведені експерименти з визначення стійкості токарних різців [7]. Стійкість різців, оснащених твердосплавними пластинами, оцінюється кількістю оброблених деталей за час періоду стійкості. Недостатня стійкість призводить до зниження продуктивності та додаткових витрат інструментального матеріалу. Тому в цій роботі приділено увагу не тільки підбору режимів різання, а й способам формування та відновлення ріжучої кромки твердосплавного інструменту.

На рис. 5,6 показано мікрофотографію (а) і профілограму (б) поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового та електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. У проведених дослідженнях за критерій стійкості різального інструменту прийнято величину фаски зносу по задній поверхні $h_3=0,4$ мм, на підставі рекомендацій чинної нормативної документації.

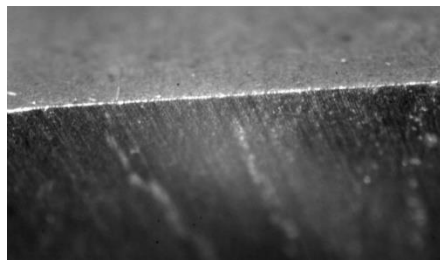


а – Мікрофотографія ріжучої кромки твердого сплаву ВК6

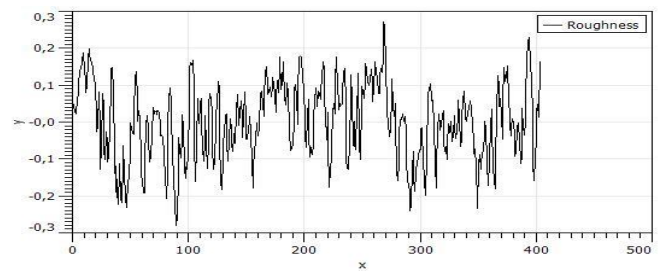


б – Профілограма ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 (Ra 2,793 мкм)

Рис.5 – Стан поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового шліфування



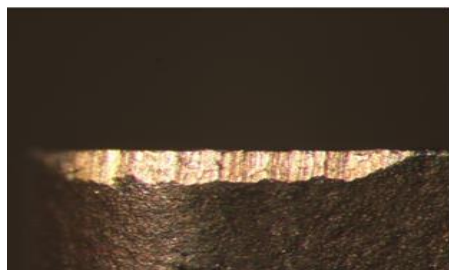
а – Мікрофотографія ріжучої кромки твердого сплаву ВК6



б – Профілограма ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 (Ra 0,827 мкм)

Рис. 6 – Стан поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після електроерозійного шліфування сплаву ВК6 після електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів

На рис.7 показано знос пластин за однакових режимів різання, але різних за часом різання. Результати досліджень показали, що $h_3=0,4$ мм, обраний як критерій стійкості, на пластині після алмазно-іскрового шліфування досягається через 55 хв. Пластина, яку обробили електроерозійним шліфуванням, через такий самий термін роботи зношена на 0,28 мм. Знос $h_3=0,4$ мм пластини після електроерозійного шліфування відбувається через 84 хв. роботи.



а) після алмазно-іскрового шліфування ($h_3=0,4$ мм при $T=55$ хв)



б) після електроерозійного шліфування ($h_3=0,4$ мм при $T=84$ хв)

Рис. 7 Фаска зносу по задній поверхні пластини

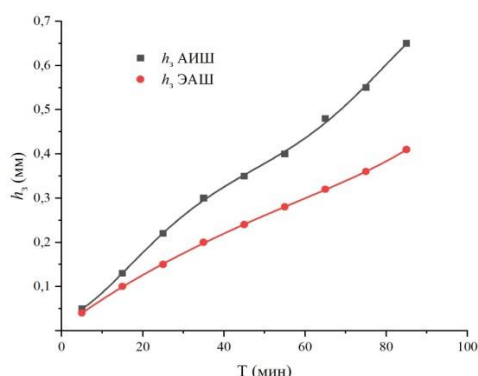


Рис. 8 – Залежність зносу пластини ВК6 від часу точіння.

Таким чином, сумарний час нормального зносу, за який досягається обране значення $h_3=0,4$ мм у заточеній пластини способом електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів вище на 53%. Результати проведених випробувань показано на рис. 8. Вивчено стан поверхневого шару в пластинках ВК6 після алмазно-іскрового та електроерозійного шліфування; виявлено зниження рівня стискальних залишкових макронапруг при алмазно-іскровому шліфуванні, що пояснюється вищим рівнем температур, які розвиваються в зоні різання. Наприклад, після електроерозійного шліфування виявлені деформації істотно вищі за ($\varepsilon = 0,036$ мм) і рівень залишкових стискаючих напружень становить $\sigma = -3,8$ ГПа; після алмазно-іскрового шліфування деформація $\varepsilon = 0,012$ мм, а $\sigma = -1,2$ ГПа.

Висновки. Аналіз представлених результатів під час електроерозійного шліфування показує, що стійкість шліфованих інструментів залежить від залишкових макронапруг, що виникають у поверхневому шарі. Більшим значенням макронапруг стиснення (σ) відповідають вищі значення часу роботи (T) і менша шорсткість поверхні ріжучої кромки порівняно з процесом алмазно-іскрового шліфування.

Таким чином, можна вважати встановленим взаємозв'язок залишкових макронапруг стиснення в процесі електроерозійного алмазного шліфування, який розглядається, зі змінюваною полярністю електродів і стійкістю, виготовлених з нього ріжучих інструментів.

Отже, електроерозійне алмазне шліфування є перспективним методом обробки твёрдосплавного інструменту, оскільки сприяє формуванню сприятливих залишкових напружень у поверхневому шарі, що підвищує його довговічність і зносостійкість. Дослідження цих процесів є важливим для оптимізації технології обробки та покращення експлуатаційних характеристик інструментів.

Список літератури:

1. Electrical Discharge Grinding of Polycrystalline Diamond | Scientific.Net, <https://www.scientific.net/MSF.471-472.457>, last accessed 2025/02/06.
2. Rahim, M.Z., Li, G., Ding, S., Mo, J., Brandt, M.: Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. *Int J Adv Manuf Technol.* 85, 263–277 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7935-z>.
3. Chen, Y., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A.: Polishing of polycrystalline diamond by the technique of dynamic friction. Part 2: Material removal mechanism. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 47, 1615–1624 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.11.003>.
4. Jaensson, B.O.: Residual stresses and stress-strain behaviour of the WC-Co composite material. *Materials Science and Engineering.* 8, 41–53 (1971). [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(71\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(71)90041-3).
5. Zuñega, J.C.P., Gee, M.G., Wood, R.J.K., Walker, J.: Scratch testing of WC/Co hardmetals. *Tribology International.* 54, 77–86 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.027>.
6. Yang, J., Roa, J.J., Schwind, M., Odén, M., Johansson-Jõesaar, M.P., Llanes, L.: Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WC-Co cemented carbides. *Materials Characterization.* 134, 302–310 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.004>.
7. Cruz, D.C., Sordi, V.L., Ventura, C.E.H.: Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. *Int J Adv Manuf Technol.* 108, 323–330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05382-y>.

References (transliterated):

1. Electrical Discharge Grinding of Polycrystalline Diamond | Scientific.Net, <https://www.scientific.net/MSF.471-472.457>, last accessed 2025/02/06.
2. Rahim, M.Z., Li, G., Ding, S., Mo, J., Brandt, M.: Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. *Int J Adv Manuf Technol.* 85, 263–277 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7935-z>.
3. Chen, Y., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A.: Polishing of polycrystalline diamond by the technique of dynamic friction. Part 2: Material removal mechanism. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 47, 1615–1624 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.11.003>.
4. Jaensson, B.O.: Residual stresses and stress-strain behaviour of the WC-Co composite material. *Materials Science and Engineering.* 8, 41–53 (1971). [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(71\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(71)90041-3).

5. Zuñega, J.C.P., Gee, M.G., Wood, R.J.K., Walker, J.: Scratch testing of WC/Co hardmetals. Tribology International. 54, 77–86 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.027>.
6. Yang, J., Roa, J.J., Schwind, M., Odén, M., Johansson-Jöesaar, M.P., Llanes, L.: Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WC-Co cemented carbides. Materials Characterization. 134, 302–310 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.004>.
7. Cruz, D.C., Sordi, V.L., Ventura, C.E.H.: Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. Int J Adv Manuf Technol. 108, 323–330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05382-y>.

Надійшла (received) 10.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Стрельчук Роман Михайлович (Strelchuk Roman) – доктор технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.

Рябенков Ігор Олександрович (Riabenkov Ihor) – кандидат технічних наук, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем факультету авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0009-0006-5375-5089>; e-mail: rigor0212@gmail.com.

ТАРЕЛЬНИК В. Б., ДОЦЕНКО А. О., МОТУЗНИЙ М. М.

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗАХИСНИХ ВТУЛОК САЛЬНИКОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ НАСОСІВ, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ КОРОЗІЙНОЇ І АБРАЗИВНОЇ АКТИВНОСТІ

Метою роботи є підвищення ефективності вузла сальникового ущільнення (СУ) відцентрового насоса, працюючого в важких умовах корозійного і абразивного впливу, притаманному меліоративним системам, шляхом нанесення на поверхню захисної втулки (ЗВ) комбінованого композиційного покриття (ККП), за рахунок послідовного використання екологічно безпечних методів: цементації електроіскровим легуванням (ЦЕЛІ) + нанесення металополімерного матеріалу (МПМ) + обробка металоріжучим інструментом (МІ) + безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО).

Задачами дослідження були: оцінка впливу різних матеріалів ЗВ на знос та визначення впливу ККП на величину зносу поверхні ЗВ.

Авторами запропонований новий спосіб захисту поверхневих шарів ЗВ СУ насосів, працюючих в важких умовах меліоративних систем, від корозійного і абразивного зношування, який полягає в формуванні на їх поверхнях ККП, нанесених в послідовності: ЦЕЛІ + МПМ + обробка МІ + БУФО, що значно збільшує здатність опиратися зношуванню, та гарантує більш надійну роботу в агресивних середовищах. Матеріали досліджуваних зразків по стійкості проти корозійного і абразивного зношування розподіляються в ряд: 30X13, 12X18H10T і 40X. Металеві порошки, які використовують при армуванні ПМ, по ступеню забезпечення найменшого зносу розподіляються в послідовності: порошок нітриду цирконію, порошок карбиду вольфраму і нікелю. Шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $Ra = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбиду вольфраму і нікелю. Динаміка зношування сталевих зразків, під дією корозії і абразивних часток, характеризується збільшенням з часом її ефективності, що більш відображається на зразках з покриттями, які поступово втрачають вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії). У зразків без покриттів, з часом на поверхні збільшується кількість зруйнованих ділянок і інтенсивність зношування, хоч і значно менш ніж у зразків без покриття, але вона також має місце. В першому наближенні графіки зношування зразків зі сталі 30X13, 12X18H10T і 40X, як з покриттями так і без покриттів, нагадують експоненційно зростаючу залежність.

Ключові слова: електроіскрове легування, сальникове ущільнення, захисна втулка, металополімерні матеріали, металорізальний інструмент, знос, твердість, шорсткість, екологічна безпека.

TARELNYK V., DOTSENKO A., MOTUZNYI M.

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF PROTECTIVE SLEEVES OF PACKING SEALS IN PUMPS OPERATING UNDER CONDITIONS OF INCREASED CORROSIVE AND ABRASIVE ACTIVITY

The aim of this work is to increase the efficiency of the packing seal unit (PS) of a centrifugal pump operating under severe conditions of corrosive and abrasive impact typical of reclamation systems, by applying a combined composite coating (CCC) to the surface of the protective sleeve (PS). This is achieved through the sequential use of environmentally safe methods: cementation by electrospark alloying (CESA) + application of a metal-polymer material (MPM) + machining with a metal-cutting tool (MCT) + non-abrasive ultrasonic finishing treatment (NAUFT).

The objectives of the study were to evaluate the influence of different protective sleeve materials on wear and to determine the effect of the CCC on the magnitude of wear of the protective sleeve surface.

The authors propose a new method for protecting the surface layers of protective sleeves of pump packing seals operating under severe conditions of reclamation systems from corrosive and abrasive wear. The method consists in forming a CCC on their surfaces applied in the following sequence: CESA + MPM + machining with an MCT + NAUFT. This significantly increases wear resistance and ensures more reliable operation in aggressive environments. According to resistance to corrosive and abrasive wear, the materials of the investigated samples are ranked as follows: 30Kh13, 12Kh18N10T, and 40Kh steels. Metal powders used for reinforcing the polymer material, in terms of ensuring minimal wear, are arranged in the sequence: zirconium nitride powder, tungsten carbide powder, and nickel powder. The surface roughness of samples made of 30Kh13 steel with a CCC, in which zirconium nitride powder was used for polymer reinforcement, after 24 hours of testing is $Ra = 2.2$ μm , which is respectively 4.5% and 40.1% better than when using tungsten carbide and nickel powders. The wear dynamics of steel samples under the action of corrosion and abrasive particles are characterized by an increase in wear intensity over time, which is more pronounced in coated samples that gradually lose the influence of the CCC properties (hardness and corrosion protection) on the wear process. In uncoated samples, the number of damaged areas on the surface and the wear intensity increase over time; although this increase is significantly smaller than in coated samples, it is still present. As a first approximation, the wear curves of samples made of 30Kh13, 12Kh18N10T, and 40Kh steels, both with and without coatings, resemble an exponentially increasing dependence.

Keywords: electrospark alloying, packing seal, protective sleeve, metal-polymer materials, metal-cutting tool, wear, hardness, surface roughness, environmental safety.

ТАРЕЛЬНИК В. Б., ДОЦЕНКО А. А., МОТУЗНИЙ М. М.

ПОВЫШЕНИЕ ЗНОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ВТУЛОК САЛЬНИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ И АБРАЗИВНОЙ АКТИВНОСТИ

Целью работы является повышение эффективности узла сальникового уплотнения (СУ) центробежного насоса, работающего в тяжелых условиях коррозионного и абразивного воздействия, присущие меліоративным системам, путем нанесения на поверхность защитной втулки (ЗВ) комбинированного композиционного покрытия (ККП), за счет последовательного использования экологически безопасных методов: цементации электроискровым легированием (ЦЭИЛ) + нанесение металополімерного материала (МПМ) + обработка металлоріжучим інструментом (МІ) + безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО).

Задачами исследования были: оценка влияния различных материалов ЗВ на износ и определение влияния ККП на величину износа поверхности ЗВ.

Авторами предложен новый способ защиты поверхностных слоев ЗВ СУ насосов, работающих в тяжелых условиях меліоративных систем, от коррозионного и абразивного износа, который заключается в формировании на их поверхностях ККП, нанесенных в последовательности: ЦЭИЛ + МПМ+ обработка МІ + БУФО, что значительно увеличивает способность сопротивляться износу и гарантирует более надежную работу в агрессивных средах. Материалы изучаемых образцов по стойкости против коррозионного и абразивного износа распределяются в ряд: 30X13, 12X18H10T и 40X.

Металлические порошки, используемые при армировании ПМ, по степени обеспечения наименьшего износа распределяются в последовательности: порошок нитрида циркония, порошок карбида вольфрама и никеля. Шероховатость поверхностного слоя образцов, выполненных из стали 30X13 из ККП, в которых для армирования ПМ использовали порошок из нитрида циркония, после 24 часов испытаний, составляет $Ra = 2,2$ мкм, что соответственно на 4,5 и 40,1 % лучше, чем при использовании порошков из карбида вольфрама и никеля. Динамика износа стальных образцов, под действием коррозии и абразивных частиц, характеризуется увеличением со временем ее эффективности, что более отражается на образцах с покрытиями, которые постепенно теряют влияние на процесс износа свойств ККП (твердости и защиты от коррозии). У образцов без покрытий, со временем на поверхности увеличивается количество разрушенных участков и интенсивность износа, хотя и значительно меньше, чем у образцов без покрытия, но также имеет место. В первом приближении графики износа образцов из стали 30X13, 12X18H10T и 40X, как с покрытиями, так и без покрытий, напоминают экспоненциально растущую зависимость.

Ключевые слова: электроискровое легирование, сальниковое уплотнение, защитная втулка, металлополимерные материалы, металлорежущий инструмент, износ, твердость, шероховатость, экологическая безопасность.

Вступ. В роторных насосах, працюючих в важких умовах меліоративних систем, одним з відповідальних вузлів, від якого залежить термін їх ефективної роботи насосу є сальникове ущільнення (СУ). Висновками досліджень, проведених асоціацією ущільнень в Західній Європі, майже в 85% насосів використовуються СУ [1], які позитивно відрізняються не тільки простотою конструкцією, а також низькою вартістю виготовлення.

Конструктивні особливості вузла СУ детально описані в [2], а схема представлена на рисунку 1.

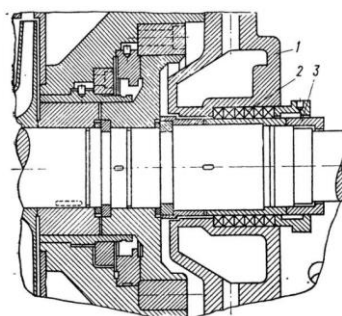


Рис. 1. – Схематичне зображення конструкції вузла СУ: 1 – корпус; 2 – розрізні кільця сальника; 3 – ЗВ [2]

Сальникова набивка виготовляється з міцного еластичного матеріалу, який повинен володіти антифрикційними і мастильними властивостями, протистояти розчиненню, розбуханню і розм'якшенню в робочому середовищі і не втрачати своїх властивостей в умовах підвищення температури. Сальникова набивка розташована у корпусі (1) у вигляді розрізних кілець (2), які стискаються в осьовому напрямку і завдяки цьому тиснуть з одного боку на захисну втулку (ЗВ) (3), а з іншого на стінки корпусу. В результаті забезпечується потрібна герметичність.

Коли насос працює, то поверхневі шари окремих його деталей контактують з рідиною, яку він перекачує. Під час роботи насосу в меліоративних системах, в рідині, як правило, присутні абразивні частки. Також рідина може бути кислою або їдкою, коли в ній присутні розчинені мінеральні добрива, або речовина, яка попадає під час обробки шкідників рослин. Рідина зношує поверхню ЗВ внаслідок дії абразивних часток, частина з яких залишає на поверхні втулки окремі подряпини, а інша частина впроваджується в поверхневі шари сальника і деякий час шаржує поверхню. Крім цього поверхня ЗВ підлягає негативному, корозійному впливу від оточуючого середовища, яке складається з рідких агрономічних препаратів, тощо.

Таким чином, підвищення зносостійкості поверхневих шарів ЗВ, працюючих в важких умовах абразивного і корозійного зношування актуальні.

Аналіз основних досягнень та літератури. Сучасне машинобудування має в своєму запасі дуже велику кількість методів захисту поверхневих шарів деталей від зношування. Найбільш розповсюдженими є методи хіміко-термічної обробки (ХТО), з яких основними є методи насичення поверхневих шарів деталей елементами вуглецю (цементация) азоту (азотування) та одночасного насичення вуглецем і азотом (нітроцементация) [3-5].

Незважаючи на низку позитивних змін в поверхневих шарах деталей при ХТО, існують і значні недоліки методу. При цементации і нітроцементации необхідне нагрівання деталі до температур вище фазових перетворень, і прискорене охолодження, що призводить до значних змін її геометрії, тобто відбуваються значні поводки та жолоблення, після чого необхідно проводити правку деталі під пресом, і якщо виникає небезпека її руйнування, то знову нагрівати, щоб знизити твердість у поверхневому шарі, підвищити пластичність і знову правити на пресі. Іноді цю операцію проводять декілька разів. Якщо деформації не дуже великі, то деталь шліфують в розмір, але при цьому знімають найбільш твердий поверхневий шар. Також усі методи ХТО довготривалі і енергозатратні, а іноді й екологічно небезпечні. Обладнання для забезпечення ХТО складне і великогабаритне [6].

Авторами [7] запропоновано матеріал ЗВ сальникових ущільнень, які серійно вироблялись зі сталі 45, замінити на сталь У8, поверхню якої зміцнюють електро механічним способом, при цьому її зносостійкість збільшується у 6,1 рази.

Аналіз літературних джерел показує, що на сьогодні більш перспективними методами зміцнення поверхневих шарів деталей є ті, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ): конденсоване іонне бомбардування (метод КІБ) [8], плазмова [9] та лазерна [10] обробка. В результаті дії КПЕ в поверхневому шарі деталі відбуваються нерівноважні процеси нагрівання та охолодження, результатом цього є утворення нових структур, які відрізняються від сформованих традиційними методами обробки.

Серед методів обробки поверхонь деталей, які використовують КПЕ, найбільш перспективним вважається метод електроіскрового легування (ЕІЛ) [11]. Застосування методу ЕІЛ користується широким попитом у спеціалістів підприємств, що займаються зміцненням поверхневих шарів деталей та інженерів дослідників, завдяки характерним особливостям: екологічною безпекою, можливістю проводити процес в локальних місцях і не захищати інші поверхні деталі, відсутністю зміни геометричних розмірів деталі (поводок та короблень), можливістю не тільки наносити на поверхню деталі любых струмопровідних матеріалів, а і насичувати поверхневий шар елементами (вуглецю, бору, сірки тощо) не змінюючи розмір деталі. Так, насичення поверхневого шару вуглецем, шляхом використання при ЕІЛ графітового електрода-інструмента (ЕІ), є процесом альтернативним цементації при ХТО. При використанні ЕІ з графіту температура в локальному місці на поверхні деталі може досягати $10000\text{ }^{\circ}\text{C}$, що активізує процес дифузії вуглецю в поверхню деталі. При високих енергіях розряду, W_p глибина цементованого методом ЕІЛ шару (ЦЕІЛ), наприклад в сталі 40Х може досягати більше 1,0 мм. Зі збільшенням W_p і зменшенням продуктивності цементації, Q відбувається збільшення глибини зміцненого шару і шорсткість поверхні, наприклад, при ЦЕІЛ сталі 40Х з $Q = 0,2\text{ см}^2/\text{хв}$ і $W_p = 6,8\text{ Дж}$ шорсткість її поверхні збільшується з $Ra = 0,5$ до 14,0 мкм, а товщина зміцненого шару досягає 1,15 мм [12]. Слід відмітити, що при ЦЕІЛ суцільність обробки поверхневого шару деталі має практично 100%, а твердість на поверхні цементованого шару знаходиться в межах 1100-900 НV.

Таким чином, для зміцнення поверхневих шарів ЗВ одним з найбільш перспективних сучасних методів, які базуються на використанні КПЕ є ЕІЛ.

Як уже згадувалось вище, недоліком ЦЕІЛ є збільшення шорсткості поверхневого шару, а також зниження втомної міцності. Ці недоліки усуваються за рахунок комбінації ЕІЛ з іншими методами покращення якості поверхні, які використовують, як при виготовленні, так і при відновленні деталей. Цими методами є нанесення полімерних матеріалів (ПМ) [13] і поверхневе пластичне деформування (ППД) [14]. Їх наносять після ЕІЛ.

При нанесенні ПМ заповнює всі западини, шорсткості, яка сформувалась при ЦЕІЛ і його поверхневий шар може бути вище або нижче виступів шорсткості. З метою досягнення найменшої шорсткості поверхні композиційного покриття, яке складається з ПМ і шорсткості цементованого матеріалу сталі, його частково видаляють (рис. 2).

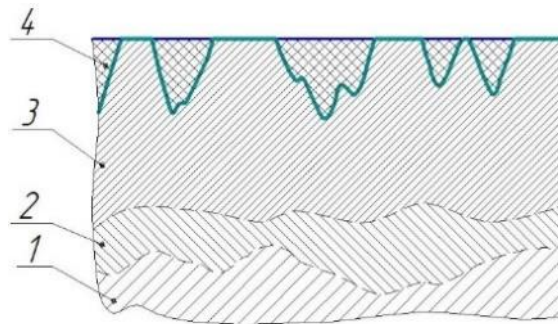


Рис. 2. – Схематичне зображення композиційного покриття, сформованого в послідовності: ЦЕІЛ+ПМ з частково видаленим шаром поверхні. 1 – основа; 2 – перехідний шар; 3 – шорсткість цементованої поверхні; 4 – покриття ПМ

Поверхневий шар можна видалити шліфуванням, але при цьому абразивні частки з шліфувального кола впроваджуються в м'який ПМ, що небажано при подальшому використанні такого покриття для ЗВ. Краще зрізати поверхню металорізальним інструментом (МІ). Враховуючи, що композиційний поверхневий шар складається з м'якого ПМ і твердого матеріалу шорсткості поверхні після ЦЕІЛ, МІ буде «працювати» на удар і його краще використовувати не з твердого сплаву, ріжуча кромка якого при ударі може сколотись, а з швидкорізальної сталі, наприклад Р6М5, на ріжучу кромку якого нанесене зносостійке покриття [15].

Зрізати поверхневий шар, з нанесеним ПМ, краще на глибину половини шорсткості, Ra , яка сформувалась на поверхні при ЦЕІЛ, тоді площа ділянок з ПМ буде приблизно дорівнювати площі, що складається з залишків виступів шорсткості. Якщо збільшувати глибину обробки, то буде збільшуватись площа, що складається з ділянок зрізаної шорсткості, а площа з ділянок ПМ, відповідно буде зменшуватись і навпаки. Низьку твердість ПМ можна збільшити шляхом додавання в нього, ще на стадії виготовлення, порошку з твердих, зносостійких металів, карбідів і нітридів, наприклад: порошку нікелю, карбиду вольфраму, нітриду цирконію [16]. Такий ПМ називають металополімерним матеріалом (МПМ). Виготовлений МПМ у вигляді консистентної речовини, ретельно втирають в сформовану методом ЦЕІЛ поверхню.

З метою підвищення втомної міцності виробу покриття з композиційного матеріалу, обробляють ППД. В останні роки серед методів ППД найбільш використовують метод БУФО – безабразивної ультразвукової фінішної обробки [11].

Враховуючи вище сказане, нами для захисту ЗВ сальникових ущільнень від зносу, пропонується на їх поверхню наносити комбіноване композиційне покриття (ККП) в послідовності: ЦЕІЛ + МПМ + обробка МІ + БУФО.

Метою роботи є підвищення ефективності вузла СУ відцентрового насосу, працюючого в важких умовах корозійного і абразивного впливу, притаманному меліоративним системам, шляхом нанесення на поверхню захисної втулки ККП, за рахунок послідовного використання екологічно безпечних методів: ЦЕІЛ + нанесення МПМ + обробка МІ + БУФО.

Задачі дослідження:

- оцінити вплив різних матеріалів деталі (захисної втулки) на знос;
- визначити вплив ККП на величину зносу поверхні ЗВ.

Науковою новизною є те, що вперше визначено глибину обробка МІ, сформованого композиційного покриття, сформованого в послідовності: ЦЕІЛ + МПМ, при якій забезпечується співвідношення однакової площини МПМ і цементованої поверхні ЗВ.

Методика дослідження. Для визначення впливу матеріалу ЗВ, які працюють в умовах різних оточуючих середовищ, були вибрані сталі різних марок: 40Х, 30Х3 і 12Х18Н10Т, з яких виготовляли зразки, розміром 15х15х15 мм. Режими термічної обробки і фізико-механічні властивості матеріалу зразків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Режими термічної обробки і механічні властивості матеріалу зразків для іспитів на зносостійкість

Матеріал зразків	Вид термічної обробки	Межа		Твердість, HV, HRC	Основні позитивні властивості
		міцності, HV	плинності, HV		
Сталь 40Х	Гартування 860 °С; відпал	53	27,5	325 HV	Висока механічна міцність, низька чутливість до корозії.
Сталь 30Х13	Гартування 1050 ⁰ С; відпал	73,5	58,8	44,0 HRC	Висока зносо- і корозійна стійкість до низько агресивних середовищ.
Сталь 12Х18Н10Т	Гартування 1080 ⁰ С, відпал	54	24	165 HV	Корозійно-стійка проти органічних кислот.

На поверхню зразків, для проведення порівняльних іспитів на знос, наносили ККП, варіанти яких зведені в таблиці 2.

МПМ складався з двокомпонентної епоксидної системи, наповненої феросиліконом марки Loctite 3478 в яку додавали порошки нікелю марки ПНЕ (ГОСТ 972297), карбиду вольфраму, виготовленому згідно ТУ 48-4205-112-2017, нітриду цирконію, зробленому згідно специфікації CAS 25658-42-8, з концентрацією, відповідно 60; 60 і 80%.

Після завершення полімеризації (затвердіння) поверхневий шар проточували МІ на глибину, яка дорівнювала половині шорсткості, Ra, сформованій на поверхні зразків після ЦЕІЛ. ЦЕІЛ проводили при $W_p=6,8$ Дж і продуктивності обробки $Q = 2,0$ см²/хв.

Таблиця 2 – Покриття для порівняльних випробувань зразків

Матеріал зразка	Склад покриття
Сталь 40Х	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО
Сталь 30Х13	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО
Сталь 12Х18Н10Т	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО

Для порівняльних випробувань зразків з покриттями і без покриттів використовували установку, конструктивні особливості якої детально описані в [16]. Установка, яка складалась з баку, заповненому водною

сумішшю піску з частинками розміром до 0,5 мм і концентрацією 50 г/л, розташовувалась на столі свердильного верстату (рис. 3, а). Крім піску в бак додавали оцет, доводячи концентрацію до 5%.

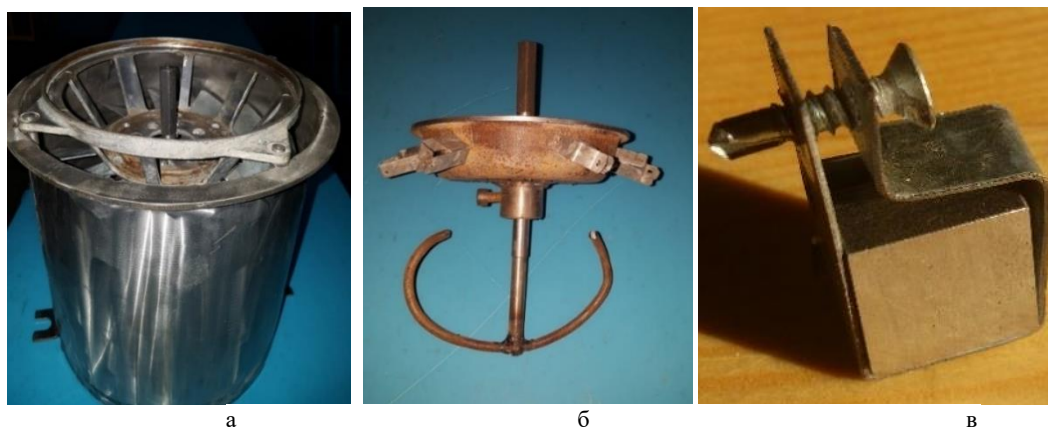


Рис. 3 – Установка для іспитів (а); ротор (б); утримувач зразків (в)

В бак розташовувався ротор (рис. 3, б), верхня частина якого знаходилась в патроні верстату, з шпинделем якого він обертався, а нижня призначалась для перемішування суміші. Крім цього на роторі закріплювався диск з розташованими на ньому утримувачами зразків (рис. 3, в).

Зразки розташовувались під кутом 45° і обертались при $v = 120$ об/хв. Лінійний знос визначався на протязі 24 годин, шляхом виміру величини шорсткості (R_a) поверхні зразка, яку вимірювали профілографом - профілометром через кожні 6 годин випробувань.

Під час проведення порівняльних іспитів зразки були розділені на дві серії по шість зразків в кожній:

1) Зразки сталей марок: 40X, 30X3 і 12X18H10T без покриття і з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком нікелю + обробка МІ + БУФО.

2) Зразки сталей марок: 40X, 30X3 і 12X18H10T з покриттям:

- ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком WC + обробка МІ + БУФО;

- ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком NZr + обробка МІ + БУФО.

Результати досліджень. Перед началом іспитів шорсткість зразків без покриття, після шліфувки, складала $R_a = 0,12-0,15$ мкм, а після ЦЕЛІ → нанесення МПМ → обробка МІ+ БУФО, знаходилась в межах 0,5 - 0,6 мкм.

Результати, проведених іспитів, на зносостійкість зведені в таблицю 3 і представлені на рисунках 4 і 5.

Таблиця 3 – Результати досліджень зношування сталевих зразків з матеріалу: 40X, 30X3 і 12X18H10T в умовах корозійного і абразивного впливу

№ зразка	Покриття	Шорсткість, R_a , мкм			
		6 год	12 год	18 год	24 год
Перша серія					
1	Сталь 40X без покриття	1,6	3,4	4,3	6,2
2	Сталь 30X13 без покриття	1,1	2,3	3,5	4,7
3	Сталь 12X18H10T без покриття	1,2	2,4	3,6	4,8
4	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,7	2,6	3,6
5	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,5	2,3	3,1
6	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,6	2,4	3,3
Друга серія					
1	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ** + обробка МІ + БУФО	0,5	1,1	1,9	2,9
2	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,9	1,5	2,3
3	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ** обробка МІ + БУФО	0,5	1,0	1,7	2,5
4	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	1,0	1,8	2,8
5	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,8	1,4	2,2
6	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,9	1,6	2,4

*-армування порошком Ni; **- армування порошком WC; ***-армування порошком NZr.

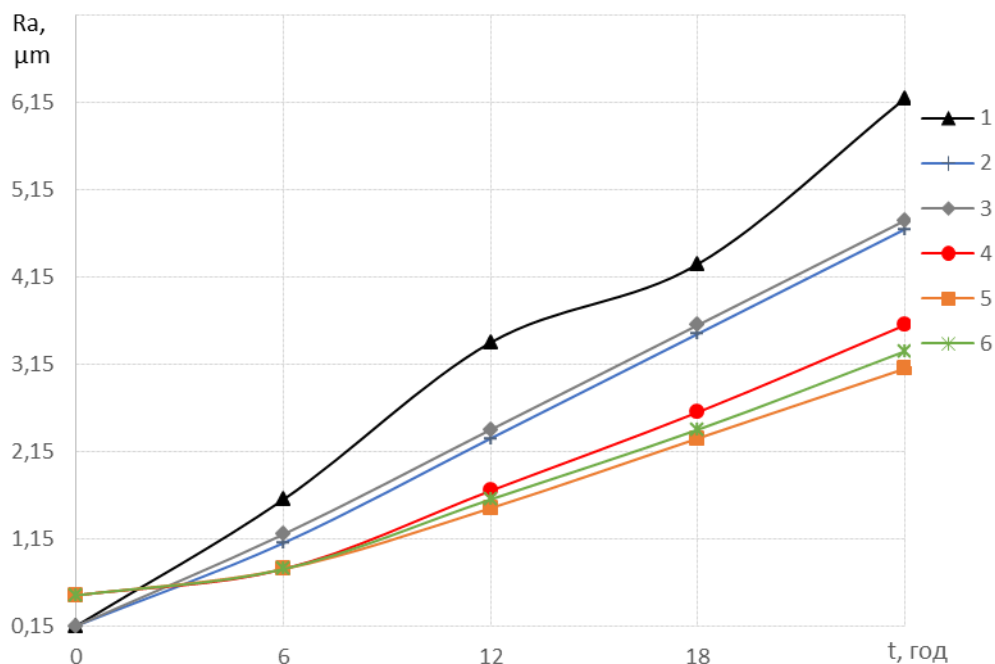


Рис. 4. – Результати зношування зразків в умовах корозійного і абразивного впливу: 1; 2 і 3 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 без покриття; 4; 5 і 6 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО

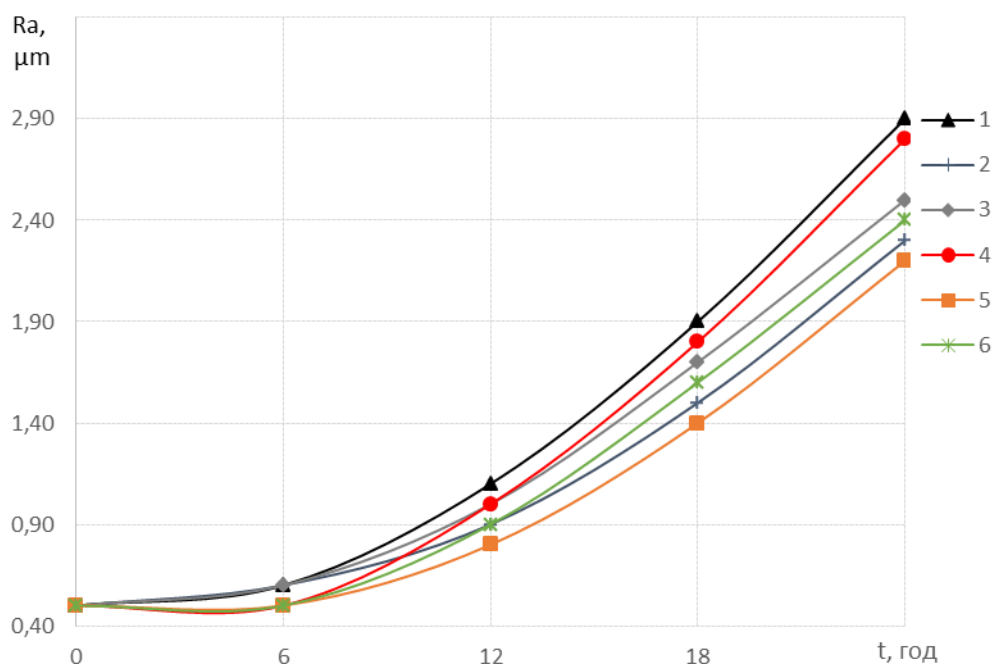


Рис. 5. – Результати зношування зразків в умовах корозійного і абразивного впливу: 1; 2 і 3 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО; 4; 5 і 6 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО

Аналіз таблиці 3 і рисунків 4 і 5 показав, що серед зразків без покриття, кращою зносостійкістю проти корозії і абразивного зносу володіють зразки, виготовлені зі сталі 30Х13, шорсткість яких після 24 годин іспитів становить $Ra = 4,7$ мкм, що відповідно на 2,1 і 31,9% краще ніж у зразків зі сталі 12Х18Н10Т і 40Х.

Серед ККП, які використовували для захисту сталевих зразків від зношування в умовах підвищеного корозійного і абразивного впливу, характерного для поверхонь деталей гідравлічних машин, що працюють у меліоративних системах, кращі показники мають покриття, в яких в якості матеріалу для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію. Так шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $R_a = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбіду вольфраму і нікелю.

Характерною особливістю динаміки зношування в умовах корозії і дії абразивних часток є те, що з часом ефективність процесу зношування зростає, що більш виражається на зразках з покриттями. Це пояснюється тим, що з часом, (по мірі заглиблення) зменшується вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії), а у зразків без покриттів з часом на поверхні з'являється все більш зруйнованих ділянок і зростання інтенсивності зношування, хоч і значно менш ніж у зразків з покриттями, але також має місце. Характер залежності зношування від часу випробування в першому наближенні нагадує експоненційно зростаючу залежність.

Висновки:

1. Запропонований новий спосіб захисту поверхневих шарів захисних сталевих втулок сальникових ущільнень насосів, працюючих в важких умовах меліоративних систем, від корозійного і абразивного зношування, який полягає в формуванні на їх поверхнях комбінованих композиційних покриттів (ККП), нанесених в послідовності: ЦЕЛ + МПМ + обробка МІ + БУФО, значно збільшує здатність опиратися зношуванню, та гарантує більш надійну роботу в агресивних середовищах.

2. Матеріали досліджуваних зразків по стійкості проти корозійного і абразивного зношування розподіляються в ряд: 30X13, 12X18H10T і 40X. Кращою зносостійкістю володіють зразки, виготовлені зі сталі 30X13, шорсткість яких становить $R_a = 4,7$ мкм, що відповідно на 2,1 і 31,9% краще ніж у зразків зі сталі 12X18H10T і 40X.

3. Металеві порошки, які використовують при армуванні МПМ, по ступеню забезпечення найменшого зносу поверхонь в умовах дії підвищеної корозії і абразиву, розподіляються в послідовності: порошок нітриду цирконію, порошок карбіду вольфраму і нікелю. Шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $R_a = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбіду вольфраму і нікелю.

4. Динаміка зношування сталевих зразків, під дією корозії і абразивних часток, характеризується збільшенням з часом її ефективності, що більш відображається на зразках з покриттями, які поступово втрачають вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії). У зразків без покриттів, з часом на поверхні збільшується кількість зруйнованих ділянок і інтенсивність зношування, хоч і значно менш ніж у зразків без покриття, але вона також має місце.

5. В першому наближенні графіки зношування зразків зі сталі 30X13, 12X18H10T і 40X, як з покриттями так і без покриттів, нагадують експоненційно зростаючу залежність.

Список літератури

1. Gaft J. A choice of the seal for the shaft of the pump / J. Gaft, M. Marcinkowski // *Proceeding of the Pump Users International Forum*. - Karlsruhe, 2004. - P. 37-44.
2. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : навч. посіб. / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко, А. В. Свухов, Д. О. Жигилій. - Суми: Сумський державний університет, 2020. - 270 с.
3. Fernandes F. A. P. Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. - 2010. - Vol. 40 (2). - P. 175.
4. Yeh S. H. Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / S. H. Yeh, L. H. Chiu, H. Chang // *Engineering, Scientific Research Publishing*. - 2011. - Vol. 9 (3). - P. 942.
5. Ben Slima S. Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / S. Ben Slima // *Materials Sciences and Applications*, 2012. - Vol. 9 (3). - P. 640.
6. Тарельник В. Б. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування графітовим електродом / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Б. О. Саржанов // *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. Серія: Технологія захисту довкілля. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2019. Вип. 19 (2). - С. 118-126.*
7. Куликівський В. Л. Механічні властивості поверхневого шару захисних втулок після електромеханічного поверхневого загартування. / В. Л. Куликівський, В. О. Орел // *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17-19 жовтня 2024 року)*. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. - 2024. - С. 312-315.
8. Kuzmin V. I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhail'chenko, O. Kovalev, E. V. Kartaeв // *J. of Thermal Spray Technology*. - 2012. - Vol. 21, No. 1. - P. 159-168.
9. Morand G. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel / G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, D. Mantovani // *Surface and Interface Analysis*. -2021. - № 53 (7). - P. 658-671.
10. Pliszka I. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition / I. Pliszka, N. Radek // *Procedia Engineering*. - 2017. - Vol. 192. - P. 707-712.
11. Тарельник В. Б., Цементация електроерозійним легуванням : монографія / В. Б. Тарельник, Б. Антошевський, В. С. Марцинковський, Є. В. Конопляченко, А. В. Білоус - Суми: Університетська книга, 2015. - 220 с.
12. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням / В. С.

- Марцинковський, В. Б. Тарельник, А. В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10
13. Пат. 104664 UA, МПК В23Н 5/00, В23Н 9/00, С23С 28/00 (2014.01) Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Павлов О. Г., Іщенко А. О. ; заявл. 14.08.2012 ; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4, 2014.
 14. Тарельник В. Б. Дослідження залежності якісних параметрів поверхневих шарів від часу легування при електроерозійній цементації сталей / В. Б. Тарельник, А. В. Белоус // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2008. - №2. – С. 119-124.
 15. Шуляк М. Л. Зміцнення металорізальних інструментів електроіскровим легуванням пучком електродів. / М. Л. Шуляк, В. Б. Тарельник, Є. М. Гецович, О. О. Василенко, А. О. Доценко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2024. - №1 (55) - С.111-116.
 16. Пат. UA № 155984 U УКРАЇНА, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00 / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, О. М. Лавренко, М. М. Майфат, А. О. Доценко, О. Е. Білий (UA); Спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу. № u 2023 04251 Заяв. Опубл. 24.04.2024, Бюл. № 17.

Bibliography (transliterated):

1. Gaft J. A choice of the seal for the shaft of the pump / J. Gaft, M. Marcinkowski // Proceeding of the Pump Users International Forum. - Karlsruhe, 2004. - P. 37–44.
2. Pidkontrolna ekspluatatsiia obladnannya nasosnykh stantsii : navch. posib. / V. O. Panchenko, V. F. Herman, O. V. Ivchenko, A. V. Yevtukhov, D. O. Zhyhylii. - Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet, 2020. - 270 s.
3. Fernandes F. A. P. Wear of plasma nitrided and nitrocarbured AISI 316L austenitic stainless steel / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 2010. - Vol. 40 (2). - P. 175.
4. Yeh S. H. Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / S. H. Yeh, L. H. Chiu, H. Chang // Engineering, Scientific Research Publishing, 2011. - Vol. 9 (3). - P. 942.
5. Ben Slima S. Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / S. Ben Slima // Materials Sciences and Applications, 2012. - Vol. 9 (3). - P. 640.
6. Tarelnyk V. B. Sposib ekolohichno bezpechnoho zmitsnennia detalei z lystovoi stali metodom elektroeroziinoho lehuвання hraftitovym elektrodom / V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, B. O. Sarzhanov // Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia. Seriia: Tekhnolohiia zakhystu dovkillia. - Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. - 2019. Vyp. 19 (2). - S. 118–126.
7. Kulykivskiy V. L., Orel V. O. Mekhanichni vlastyvositi poverkhnoveho sharu zakhysnykh vtulok pislia elektromekhanichnogo poverkhnoveho zahartuvannia. / V. L. Kulykivskiy, V. O. Orel // Zbirnyk tez dopovidei XKhV Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii "Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky" (17–19 zhovtnia 2024 roku). MON Ukrainy, Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Kyiv. - 2024. – S. 312-315.
8. Kuzmin V. I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. Kovalev, E. V. Kartaeв // J. of Thermal Spray Technology. - 2012. - Vol. 21, No. 1. - P. 159–168.
9. Morand G. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel / G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, D. Mantovani // Surface and Interface Analysis. -2021. - № 53 (7). - P. 658–671.
10. Pliszka I. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition / I. Pliszka, N. Radek // Procedia Engineering. - 2017. - Vol. 192. - P. 707–712.
11. Tarelnyk V. B., Tsementatsiia elektroeroziinym lehuванняm : monohrafiia / V. B. Tarelnyk, B. Antoshevskiy, V. S. Martsynkovskiy, Ye. V. Konoplianchenko, A. V. Bilous - Sumy: Universytetska knyha, 2015. - 220 s.
12. Patent Ukrainy na vynakhid № 82948, 23S 8/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziinym lehuванняm / V. S. Martsynkovskiy, V. B. Tarelnyk, A. V. Belous / Opubl. 25.03.2008, biul. № 10.
13. Pat. 104664 UA, МПК В23Н 5/00, В23Н 9/00, С23С 28/00 (2014.01) Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей / Мartsynkovskiy V. S., Tarelnyk V. B., Pavlov O. H., Ishchenko A. O. ; zaiavl. 14.08.2012 ; opubl. 25.02.2014, Biul. № 4, 2014.
14. Tarelnyk V. B. Doslidzhennia zalezhnosti yakisnykh parametriv poverkhnivykh shariv vid chasu lehuвання pry elektroeroziinii tsementatsii stali / V. B. Tarelnyk, A. V. Bilous // Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv. – 2008. - №2. – S. 119-124.
15. Shuliak M. L. Zmitsnennia metalorizalnykh instrumentiv elektroiskrovym lehuванняm puchkom elektrodів. / M. L. Shuliak, V. B. Tarelnyk, Ye. M. Hetsovych, O. O. Vasylenko, A. O. Dotsenko // Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv. – 2024. - №1 (55) - S.111-116.
16. Pat. UA № 155984 U UKRAINA, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00 / V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, N. V. Tarelnyk, M. O. Mikulina, O. M. Lavrenko, M. M. Maifат, A. O. Dotsenko, O. E. Bilyi (UA); Sposib zakhystu stalevykh detalei vid hidroabrazynnogo znosu. № u 2023 04251 Zaiav. Opubl. 24.04.2024, Biul. № 17.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тарельник В'ячеслав Борисович (Tarelnyk Viacheslav) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380503072572, e-mail: tarelnyk@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2005-5861

Доценко Артем Олексійович (Dotsenko Artem) – аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380660463318, e-mail: a.dotsenko.olivija@gmail.com ORCID: 0009-0000-7230-9435

Мотузний Максим Миколайович (Motuznyi Maksym) - аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380678966605, email: Motuzniy7@gmail.com ORCID 0009-0008-9759-797X

S. KOVALEVSKYY**MAGNETIC-RESONANCE AMORPHIZATION OF CONTACT KINEMATIC PAIR MATERIALS**

In modern mechanical engineering, the requirements for the reliability and durability of components are constantly increasing, especially for those operating under intensive friction and high contact pressures. Traditional methods for improving wear resistance, such as alloying, coating applications, or heat treatment, often prove insufficiently effective or have limitations in terms of control and uniformity of surface modification. This article presents an innovative approach to surface-layer modification of materials—magnetic-resonance treatment—which enables the formation of unique microstructures, including partial amorphization, directly in the contact zone during operation. The aim of the study is the experimental justification of the application of magnetic-resonance treatment for the formation of an amorphous phase in the surface layers of materials in contact kinematic pairs to significantly enhance their wear resistance. The work thoroughly examines the theoretical foundations and analyzes current scientific research in the field of surface modification and the influence of strong physical fields on material structure and properties. Special attention is paid to phenomena of self-organization and phase transformations occurring under friction under the influence of magnetic fields. Experimental studies were carried out on D2 steel specimens subjected to magnetic-resonance treatment on a specialized rig. Friction and wear tests showed a significant reduction in the coefficient of friction (to 0.022–0.026) and wear intensity (by 3–4 times), indicating the formation of super-hard and super-plastic amorphous regions on the surface. Microstructural analysis by electron microscopy and X-ray diffraction confirmed the formation of martensitic phase and amorphous zones, as well as the reduction of crystallite size to the nanoscale in the contact zone. It is substantiated that these structural changes, induced by the resonant influence of a strong magnetic field, are the key factor in improving tribological characteristics. The obtained results demonstrate the high efficiency of the proposed magnetic-resonance treatment method. It was established that, under the influence of strong magnetic fields, amorphous and nanocrystalline structures form on friction surfaces, fundamentally altering the mechanisms of surface interaction, minimizing adhesive and abrasive wear. This confirms the hypothesis of the possibility of directed amorphization of materials to enhance their operational resilience. The practical significance of the study lies in the development of a new, environmentally friendly, and energy-efficient method for increasing the service life of machine components, which can be implemented in various branches of mechanical engineering, including aerospace, automotive, and instrument manufacturing, to create ultra-wear-resistant contact elements.

Keywords: tribology; magnetic-resonance treatment; contact kinematic pairs; wear resistance; coefficient of friction; amorphization; microstructure; phase transformations; nanocrystalline structures.

С. В. КОВАЛЕВСЬКИЙ**МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНА АМОРФІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ КОНТАКТНИХ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР**

У сучасному машинобудуванні вимоги до надійності та довговічності деталей постійно зростають, особливо для тих, що працюють в умовах інтенсивного тертя та високих контактних навантажень. Традиційні методи підвищення зносостійкості, такі як легування, нанесення покриттів або термічна обробка, часто виявляються недостатньо ефективними або мають обмеження щодо керованості й однорідності модифікації поверхні. У цій статті представлено інноваційний підхід до модифікації поверхневого шару матеріалів — магнітно-резонансну обробку, яка забезпечує формування унікальних мікроструктур, зокрема часткової аморфізації, безпосередньо в зоні контакту під час роботи. Метою дослідження є експериментальне обґрунтування застосування магнітно-резонансної обробки для формування аморфної фази у поверхневих шарах матеріалів контактних кінематичних пар з метою істотного підвищення їх зносостійкості. У роботі ґрунтовно розглянуто теоретичні засади та проаналізовано сучасні наукові дослідження у сфері модифікації поверхні й впливу сильних фізичних полів на структуру та властивості матеріалів. Особливу увагу приділено явищам самоорганізації та фазових перетворень, що відбуваються під час тертя під впливом магнітних полів. Експериментальні дослідження проведено на зразках сталі D2, які піддавалися магнітно-резонансній обробці на спеціалізованій установці. Випробування на тертя та зношування показали значне зниження коефіцієнта тертя (до 0,022–0,026) та інтенсивності зношування (у 3–4 рази), що свідчить про формування на поверхні надтвердих і надпластичних аморфних ділянок. Мікроструктурний аналіз за допомогою електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції підтвердив утворення мартенситної фази й аморфних зон, а також зменшення розміру кристалітів до наномасштабу в зоні контакту. Обґрунтовано, що ці структурні зміни, індуковані резонансним впливом сильного магнітного поля, є ключовим чинником підвищення трибологічних характеристик. Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованого методу магнітно-резонансної обробки. Встановлено, що під впливом сильних магнітних полів на поверхнях тертя формуються аморфні та нанокристалічні структури, які принципово змінюють механізми взаємодії поверхонь, мінімізуючи адгезійне та абразивне зношування. Це підтверджує гіпотезу щодо можливості керованої аморфізації матеріалів для підвищення їх експлуатаційної стійкості. Практичне значення дослідження полягає у розробленні нового, екологічно безпечного та енергоефективного методу збільшення ресурсу деталей машин, який може бути впроваджений у різних галузях машинобудування, зокрема в авіакосмічній, автомобільній та приладобудівній промисловості, для створення надзносостійких контактних елементів.

Ключові слова: трибологія; магнітно-резонансна обробка; контактні кінематичні пари; зносостійкість; коефіцієнт тертя; аморфізація; мікроструктура; фазові перетворення; нанокристалічні структури.

1. Introduction

In the global research arena, the issue of increasing the wear resistance of kinematic pairs occupies a special place due to the growing demands for the reliability and durability of mechanical engineering equipment. Accordingly, studies focus not only on traditional materials science approaches (alloying, creation of composite coatings, application of thin films) but also on innovative surface modification technologies capable of forming specialized microstructures in the contact zone directly during operation [1,2]. Most classical investigations are devoted to improving material compositions and introducing coatings (metallic, ceramic, diamond-like) to increase hardness and corrosion resistance [3]. However, under real operating conditions, such methods do not always provide the required level of protection, especially in the case of high contact pressures and abrupt temperature fluctuations. Thus, laser surface treatment enables the creation of a refined microstructure through localized heating and rapid cooling, sometimes resulting in the formation of martensitic or partially amorphous phases [4]. Yet, precise control of energy input and exposure time remains challenging, which limits the reproducibility and uniformity of the amorphous layer [5].

© S. Kovalevskyy, 2025

Given the above, the relevance of this study lies in the search for new, effective, and controllable methods of modifying material surface layers to ensure enhanced wear resistance of machine components under extreme loading conditions.

The aim of the research is to improve the reliability of machine kinematic pairs by creating an amorphous layer on the contact surfaces using magnetic-resonance processing of materials (MRPM) in a two-component resonance vibration mode. To achieve this aim, the following interrelated objectives are proposed:

1. Development of a theoretical model of amorphization.
2. Optimization of two-component resonance regimes.
3. Validation of experimental results.

Thus, the overall aim combines theoretical elaboration of the amorphization mechanisms under two-component resonance, laboratory studies with high-precision measurement of microstructural parameters and tribological indices, and evaluation of the practical effect through statistical analysis of lifetime and reliability of kinematic pairs. As a result, an integrated picture is constructed of how the formation of an amorphous layer under the action of balanced normal and tangential vibrations alters friction mechanisms, wear intensity, and component durability.

The scientific hypothesis is that the synchronous action of two-component resonant loading—arising from the combination of normal and tangential vibrations in the presence of an external magnetic field—creates the most favorable conditions for the accumulation of defect energy, local heating, and activation of diffusion processes, leading to the formation of an amorphous layer on the contact surfaces of kinematic pairs.

2. Analysis of the results of previous research.

In many research laboratories in Germany, the USA, Japan, and other industrially developed countries, work has been intensified on the use of pulsed electromagnetic fields to form an amorphous phase in the material's contact zone [6]. Most such experiments focus on single-phase oscillatory modes, where either tangential (parallel to the surface) impulses predominate, or normal (perpendicular) impulses predominate [7]. The application of high-frequency tangential impulses in combination with a constant external magnetic field demonstrates the ability to form thin amorphous layers through the synergy of electromagnetic and thermal effects [8]. Existing publications consider the kinetics of the crystalline-to-amorphous transition under high-frequency electromagnetic excitation taking into account the thermal effect [9]. However, these models largely do not account for the combined action of oscillatory influences in different directions, leading to an inaccurate estimation of the amorphous layer thickness under real technological conditions. In a number of theoretical works, attention has been drawn to the correlation between the formation of an amorphous phase and an increase in service life, but there is no unified mathematical model that would provide an integrated picture of the dependence of the amorphous layer thickness on the amplitude, frequency, and ratio of the components of resonant oscillations [10].

In the international literature, experimental results are often reported showing that an amorphous layer reduces the coefficient of friction and extends the maintenance interval of parts by 2–3 times [11]. However, most studies focus on single-phase amorphization modes (laser or electromagnetic excitation), without considering the combined mechanical component [12]. Analysis of SEM and XRD images confirms the formation of an amorphous phase, but is rarely accompanied by extensive mathematical reliability calculations that take into account the dependence of wear intensity and failure functions on the actual increase in amorphous layer thickness [13].

The most significant gap lies in the limited number of systematic studies of two-component resonance, where normal and tangential oscillations are cohesively combined to maximally enhance local plastic deformation and high-frequency heating. Practically no published works combine precise calculation of tangential stresses depending on the synergy of different oscillation components, dynamic thermal effects, and prediction of the reliability function of a kinematic pair with regard to amorphization. Thus, although a significant body of knowledge on various surface amorphization methods (laser, electromagnetic, thermal) has been accumulated in world science, there is a lack of thorough studies that holistically cover two-component resonant oscillations and their impact on the mechanisms of amorphous layer formation, changes in friction coefficient, and prediction of reliability functions of kinematic pairs [14, 15]. This defines the need for comprehensive theoretical and experimental research integrating mathematical modeling, microstructure analysis, and real dynamic loading regimes.

In modern Ukrainian scientific and production structures, the problem of improving the wear resistance of surface technological elements is actively researched mostly within the framework of classical materials science and surface methods. Compared to leading global directions, domestic scientific schools have yet to develop a sufficiently systematic approach to integrating the latest surface modification methods under actual industrial conditions, and especially to the application of pulsed magneto-mechanical resonance treatment with two-component resonant oscillations [16].

3. Amorphization of surfaces in improving the reliability of machine-building parts.

The presence of an amorphous layer noticeably alters the surface properties [17]. First and foremost, the coefficient of friction decreases. The amorphous structure lacks clearly defined atomic slip planes, which prevents the formation of microcracks and brittle spalling [18]. This creates a “pseudo-surface” effect that functions as a damper under load.

The amorphous phase also exhibits high hardness. Due to the absence of a granular crystalline defect structure and “weak” points, the hardness of the layer increases by 20–30% compared to the base material. This enhances load-bearing capacity and extends the service life of components. Another advantage of the amorphous layer is its resistance to fatigue failure [19]. Unlike crystalline materials, where cracks predominantly propagate along slip planes, the amorphous layer has no such directional zones, so cracks occur less frequently and fatigue damage is deferred in time.

At the same time, the amorphous layer may be non-uniform in thickness. Depending on local conditions—deformation and thermal effects—it varies from several hundred nanometers to several micrometers.

The amorphous layer, or noncrystalline structure, arises in the contact zone thanks to the combination of high plastic deformation rates and localized temperature rises [20]. These conditions hinder the formation of an ordered crystalline lattice.

First, under the action of contact pressure and vibrations at the point of contact, the surface experiences localized shear. This destroys the crystalline structure, causing numerous dislocations and defects to form in the near-surface zone. If the deformation rate reaches 10^3 – 10^4 s⁻¹, the material does not have time to reorganize the lattice—the defects accumulate, and the zone transitions to a noncrystalline state [21]. Additionally, localized heating occurs in the contact zone due to thermoelectric effects and high stress concentrations. Temperatures in micro-regions may reach several thousand degrees Celsius, and the pulse duration is so short that partial breaking of crystalline bonds occurs. At the same time, the temperature is insufficient for the formation of large crystalline grains during subsequent cooling. After the heating cycle ends, extremely rapid cooling takes place - literally within fractions of a second. Under such conditions, crystals simply do not have time to grow, so the surface becomes amorphous, that is, devoid of a defined crystalline structure.

During deformation of the contact zones, where abrupt loads and local heating occur, numerous dislocations and other defects accumulate. There are so many that the material loses the ability to organize its crystalline lattice. If, in this process, the deformation energy and thermal effects exceed the bond energy in the metal, atoms begin to arrange in a chaotic order, which is the essence of the noncrystalline phase [22]. Equally important is the dependence of the amorphous layer thickness on various parameters. First, there is a certain plasticity threshold: if stresses in individual “hot spots” are below the yield limit, the amorphous layer simply does not form. Only after exceeding this threshold does the true noncrystalline transition begin. Second, the duration of exposure and the number of cycles matter: each pulse gradually increases the layer thickness. The more cycles, the deeper this layer becomes. However, it is important to remember that with excessive thickness, diffusion and recovery processes activate, which can partially return the material to a crystalline state. Third, the decisive factor is the balance between heating and cooling: if heating continues too long, it can lead to grain growth and formation of a crystalline or fine-grained structure. Therefore, it is extremely important that the heating pulse is short and quickly transitions to the cooling phase, preventing crystal nuclei from forming [23]. If the amorphous layer is sufficiently thick (several hundred nanometers), a characteristic gradient of properties forms within it. In the uppermost layer, maximum hardness and minimal internal stresses are achieved. Slightly below, a transition zone with partial crystallization appears, where micro-grains emerge. Even deeper, near the base material, regions with certain defects of the original crystalline lattice remain.

When a contact pair is treated by magnetic-resonance processing under two-component resonance conditions, an interesting feature is observed: at the initial stage, the wear curve is quite flat, indicating low wear intensity [24–27]. This continues until the amorphous layer thickness decreases to a certain critical value. If the layer thickness exceeds several hundred nanometers, it acts as a reliable barrier that prevents the emergence of sharp microscopic defects. Under such conditions, the surface effectively becomes self-lubricating, and the coefficient of friction decreases. But if the layer begins to thin, the intensity of defect formation sharply increases: the amorphous structure breaks down, exposing the subsurface region with micro-grained or even crystalline structure. This leads to a stepwise increase in wear. Regarding service life, an important indicator is the time to failure of 50% of the specimens (T_{50}). When the amorphous layer thickness exceeds 0.8–1.0 μm , T_{50} can increase by 2–3 times compared to the initial values. However, it should be noted that after the layer thickness falls below the critical threshold, T_{50} quickly approaches the original level—crystalline defects begin to dominate. From a reliability standpoint, one can use the reliability function $R(t)$, which shows the probability of failure-free operation of the contact pair over time. If the amorphous layer is thick, the failure rate is low, and $R(t)$ decreases very smoothly. But if the layer thins, $R(t)$ drops sharply, sometimes even abruptly—the amorphous region can no longer protect the surface from destruction. In practical applications, regular inspections of contact zones can be performed using, for example, scanning electron microscopy, atomic force microscopy, or hardness measurements. This allows precise determination of the residual thickness of the amorphous layer and prediction of approaching the critical service life. Thus, even before failures occur, replacement or maintenance can be scheduled, avoiding unexpected operational stoppages.

The analysis of the literature convincingly demonstrates that surface amorphization through various physico-chemical methods significantly enhances the mechanical and tribological resilience of components. However, the majority of studies focus on single-phase technologies (laser or electromagnetic amorphization). To date, the question of the interaction of different types of oscillations and the influence of the gradient structure on long-term reliability remains open. This opens up prospects for comprehensive research, especially under conditions of two-component resonant exposure.

4. Theoretical justification of MRPM.

MRPM is a technology of surface or local modification of metallic and non-metallic materials in which two interrelated physical factors act simultaneously [24–27]: mechanical nanovibrations of the surface layer of the specimen (amplitudes on the order of 10^{-9} – 10^{-8} m); high-frequency electromagnetic waves (frequency range $f_{EM} \sim 10^4$ – 10^6 Hz), consistent with the material's own oscillatory characteristics ω_n ; all this occurs in a homogeneous constant magnetic field B_0 (a neodymium magnet) that sets the preliminary magnetostrictive or magnetoresistive state of the surface layer.

As a result of the combination of mechanical and electromagnetic resonant influence, a local rearrangement of the microstructure occurs (the formation of fine-grained, nanophase formations, an increase in the level of internal plastic deformations), which enhances the hardness, wear resistance, and, in general, the resource capacity of the material.

The surface layer of the material can be envisioned as a mass of m , suspended on effective stiffness k , with damping coefficient c . In the absence of external influence, its own oscillations are characterized by the natural frequency:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ rad/s} . \quad (1)$$

In the presence of a constant magnetic field B_0 There are two possible effects: magnetoresistive: a change in electrical conductivity or in the effective stiffness of the surface layer under the influence of B_0 , which leads to correction $k \rightarrow k_{ef}$ and $c \rightarrow c_{ef}$; magnetostrictive: emergence of internal stresses due to changes in the magnetic state (especially in ferromagnetic materials), which leads to additional initial stress $\sigma_0(B_0)$.

Equation of motion of a mechanical oscillator taking into account a constant field:

$$m\ddot{x}(t) + c_{ef}\dot{x}(t) + k_{ef}x(t) = F_{mech}(t) , \quad (2)$$

where $x(t)$ - is the vertical (normal) displacement of the surface layer; $F_{mech}(t)$ - is the external mechanical excitation force; $k_{ef} = k + \Delta k(B_0)$, $c_{ef} = c + \Delta c(B_0)$.

If an alternating electric current is passed through the sample, then:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega_{EM}t), \quad \omega_{EM} = 2\pi f_{EM} , \quad (3)$$

where f_{EM} lies in the range $\sim 10^4$ – 10^6 Гц.

This current creates an oscillating magnetic field:

$$B_{EM}(t) \propto \mu_0 \frac{I(t)}{r} . \quad (4)$$

A time-varying component of the field or of mechanical oscillations is superimposed on the static magnetic field acting on the entire volume of the sample, such that at every point in space the resulting influence is the vector sum of these two fields - $B_{EM}(t)$ and B_0 . Periodic combination of these fields generates a variable magnetoresistive or magneto-driven influence on local domains and structural defects. As a result, a mechanical force arises in the material layer:

$$F_L = I(t) \times B_0 , \quad (5)$$

which, when the electromagnetic frequency ω_{EM} is matched with the natural frequency ω_n causes an amplification of mechanical oscillations. $x(t)$.

Thus, the total excitation force in the equation of motion is equal to:

$$F_{mech}(t) = \alpha I_0 B_0 \sin(\omega_{EM}t) , \quad (6)$$

where α - coefficient that depends on the geometry of the sample and its electrical conductivity σ and magnetic permeability μ .

To achieve maximal nano-oscillations, it is necessary to tune ω_{EM} to the natural frequency ω_n , that is:

$$\omega_{EM} \approx \omega_n \Rightarrow 2\pi f_{EM} \approx \sqrt{\frac{k_{ef}}{m}} . \quad (7)$$

In such a case, the amplitude of mechanical oscillations x_{max} reaches its maximum:

$$x_{max} \approx \frac{\alpha I_0 B_0}{m[2\zeta\omega_n]}, \quad \zeta = \frac{c_{ef}}{2k_{ef}m}. \quad (8)$$

Since $\zeta \ll 1$ (small damping in the nano-range), even a relatively small $I_0 B_0$ can give rise to $x_{max} \sim 10^{-9} - 10^{-8}$ nanometer oscillations.

As a result of the combination of two (resonant) modes, the following occur:

- mechanical resonance, in which:

$$m\ddot{x}(t) + c_{ef}\dot{x}(t) + k_{ef}x(t) = \alpha I_0 B_0 \sin(\omega_{EM}t), \quad \omega_{EM} \approx \omega_n \quad (9)$$

- magneto-resistive influence.

The parameters k_{ef} and c_{ef} depend on B_0 . For example, for certain ferromagnetic steels, one can write:

$$\Delta k(B_0) = \kappa_k B_0^2, \quad \Delta c(B_0) = \kappa_c B_0^2, \quad (10)$$

where κ_k, κ_c - material-dependent coefficients.

As a result of the resonance regime, increases in the intensity of plastic deformation in the subsurface layers are observed due to nanovibrations that stimulate the dissolution of defects and grains; an increase in the rate of diffusion processes (through oscillations), which activates phase transformations (formation of oxide nanolayers, impurity enrichment); the development of magneto-resistive and magnetostrictive effects simultaneously with mechanical loading, which contributes to an increase in the kinetic energy of defects and grains.

During MRPM, energy of plastic deformation accumulates in the surface layer of the material, which is caused by intensive nano-oscillations. The criterion for the onset of amorphization is the excess of deformation energy over the binding energy in the crystalline lattice. Let us denote E_d - the energy required to destroy the crystalline structure per unit volume (the activation energy of amorphization); and W_p - the energy of plastic deformation accumulated per unit volume of the surface layer.

The amorphization condition can be written in the form:

$$W_p \geq E_d. \quad (11)$$

Let the mechanical nano-oscillatory Lorentz force $F_L(t)$ with resonance frequency ω_n lead to a periodic oscillatory loading. The average power expended on plastic deformation in volume V per oscillation is estimated as:

$$P_p = \int_0^T \sigma(t) \dot{\epsilon}(t) dt, \quad (12)$$

where $\sigma(t)$ - cyclic stress, $\dot{\epsilon}(t)$ - the rate of plastic deformation, $T = 2\pi/\omega_n$.

Average density of accumulated energy after N cycles:

$$W_p = \frac{NTP_p}{V} \approx \frac{NT(\sigma\dot{\epsilon})}{V}. \quad (13)$$

Under resonance conditions, mechanical oscillations reach the maximum amplitude A_{max} , therefore the stress σ and the strain rate $\dot{\epsilon}$ increase. Then, after N_{cr} cycles, the accumulated energy may exceed E_d :

$$N_{kp} \approx \frac{E_d V}{(\sigma\dot{\epsilon})T}. \quad (14)$$

When $W_p = E_d$, the irreversible (amorphous) transition of the surface layer begins. If an alternating current of frequency ω_{EM} , tuned to the mechanical resonance ω_n , flows through the specimen, a radially distributed demagnetizing effect is created. As a result of the periodic magneto-resistive change of material parameters (Young's modulus, damping coefficient), additional generation of internal stresses (magnetostriction) occurs. The energy of this influence W_{EM} is also accumulated in the subsurface layer due to the anisotropy of the magnetic domains:

$$W_{EM} \approx \int_0^T M(t) dH(t) \approx \mu_0 \chi H_0 h V, \quad (15)$$

where $M(t)$ - magnetization, $H(t) = H_0 \sin(\omega_{EM} t)$ - alternating field, χ - magnetic susceptibility, h - amplitude of magnetoresistive change, μ_0 - magnetic constant.

Under resonant conditions $\omega_{EM} \approx \omega_n$ local defect sites receive an additional energy impulse, which promotes the activation of diffusion processes and local heating:

$$\Delta T(z) \sim \frac{W_{EM}}{\rho c_p V}, \quad (16)$$

where ρ - material density, c_p - specific heat capacity.

Local increase of temperature $\Delta T(z)$ accelerates diffusion and promotes phase transformation. The total accumulated energy in the subsurface layer:

$$W_{tot} = W_p + W_{Em}. \quad (17)$$

If $W_{tot} \geq E_d$, the conditions for amorphization are met faster than under purely mechanical action.

As a result of intensive nanovibrations in the layer with a thickness $d_{ш}$ (on the order of $\sim 0,1 \dots 1$) cyclic plastic deformations with shear amplitudes $u_{amp} \approx 10^{-9} \dots 10^{-8}$, м. The plastic accumulation of dislocations (ρ_{disl}) causes rapid fragmentation of the crystalline structure into fine grains (розмір D_{gr}). According to the modified Hall-Petch law:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k D_{gr}^{-1/2}, \quad (18)$$

where σ_y - yield strength, σ_0 - the supporting stress of large grains, k - a material-dependent coefficient.

Reduction of D_{gr} to the nano-range leads to a significant increase in σ_y , but at the same time, the internal accumulated stresses and the stored energy of defects also increase W_{plast} :

$$W_{plast} \propto \int_0^{\rho_{accr}} \tau d\rho, \quad (19)$$

where τ - shear stress.

When the dislocation density reaches a critical level ρ_{cr} , the atomic planes can no longer restructure into an ordered system, as the defect energy exceeds the migration energy. This leads to the formation of an amorphous (non-crystalline) state.

Parallel to the accumulation of dislocations under the influence of nano-vibrations, diffusion mechanisms are activated: atoms in the subsurface layer are mobilized due to oscillatory displacement and local heating. The specific diffusion rate D at the temperature $T + \Delta T$:

$$D(T + \Delta T) = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{R(T + \Delta T)}\right), \quad (20)$$

where D_0 - pre-exponential factor, Q - activation energy of diffusion, R - gas constant.

Even a slight increase in ΔT (tens of degrees) sharply increases D , which accelerates atom movement and filling of inter-dislocation gaps. Under conditions of high defect density, this creates an unstable configuration where the local structure tends toward an energy minimum. However, due to the excessive concentration of defects and the energy of jumps, amorphous zones form, which lack long-term order.

Для утворення аморфного шару необхідно досягнути певного критичного зсуву γ_{cr} у поверхневому шарі, при якому відбувається суцільна дезорієнтація частинок. Згідно з теорією деформаційної аморфізації:

$$\gamma_{cr} \approx \frac{2\pi a}{\sqrt{3} D_{gr}}, \quad (21)$$

where a - interatomic distance.

For $D_{gr} \sim 5 \dots 20$, nm, we obtain $\gamma_{cr} \approx (0,1 \dots 0,3)$. In mechanical nanovibrations, the displacement amplitude u_{amp} and frequency ω_n determine the maximum shear rate $\dot{\gamma}_{max} = \omega_n u_{amp} / d_{ш}$. If $\dot{\gamma}_{max} \cdot \tau_{cycle} \geq \gamma_{cr}$, where $\tau_{cycle} = 2\pi / \omega_n$, then during one cycle of nanovibrations the critical shear value occurs. At resonance $\omega_n \approx \omega_{EM}$ the damping β is minimal, so the amplitude u_{amp} reaches its maximum value, which ensures the condition $\gamma \geq \gamma_{cr}$.

To transition to an amorphous state, it is sufficient to achieve:

1. A high density of accumulated defects ($\rho_{disl} \geq \rho_{cr}$),
2. A local increase in temperature $\Delta T \geq T_d$,
3. A critical sheary $\geq \gamma_{cr}$,

4. Instability of the crystal lattice: $W_{tot} = E_d$.

When these conditions are simultaneously met, an amorphous layer is formed at a depth d_{amor} the thickness of which depends on the depth distribution of nanovibration intensity and the heating field profile:

$$d_{amor} \approx \sqrt{2D(T + \Delta T)t_{exp}}, \quad (22)$$

where t_{exp} - total exposure time (sum of cycles), D - diffusion coefficient.

Under typical MRPM mode with $\omega_n \sim 105, rad/s$, $u_{amp} \sim 10^{-9}$, $H_0 \sim 0,5$, T the thickness d_{amor} lies in the range $(0,2...1), \mu m$.

Thus, the final proof of the formation of the amorphous layer is determined by the following: accumulation of plastic deformation energy: intense nanovibrations at resonance lead to rapid accumulation of defect energy W_p , which exceeds E_d after N_{cr} cycles; electromagnetic resonance influence: magnetoresistive and magnetostrictive effects generate additional stress and local heating ΔT , which increases the diffusion rate and lowers the defect formation energy; quantized deformation cycles and shear: under the condition $\omega_{EM} \approx \omega_n$ the amplitude of nanovibrations reaches u_{amp} , which ensures shear $\gamma \geq \gamma_{cr}$ in a single cycle, destroys the organized crystal lattice and initiates a local transition into the amorphous phase; due to diffusion processes at a depth d_{amor} a stable amorphous layer is formed.

Thus, the fulfillment of all the mentioned conditions indicates that, under the influence of MRPM, an amorphous zone arises and develops in the surface layer. This proof is based on energetic considerations (accumulation of defect energy), crystallographic instability conditions (critical shear and dislocation density), and the activation of thermodynamic and diffusion processes.

5. Results of experimental studies and their discussion.

A detailed description of the results of experimental studies devoted to the effect of magnetic resonance processing in a dual-component resonance mode (MRPM) on the characteristics of the contact surfaces of a "shaft-bushing" pair is presented. Special attention is paid to microstructural changes, morphological features, changes in hardness, and the tribological properties of the surface layer after MRPM.

After performing a series of MRPM cycles, significant changes were revealed in the surface layer of the contact element, especially in the central zone, which can be considered a "hot spot." In this zone, where mechanical and electromagnetic influences are most intense, the average thickness of the amorphous layer was about one micrometer. However, this value proved to be non-uniform, ranging from 0.8 to 1.2 micrometers depending on the localization along the contact line. A more detailed study of the thickness profiles obtained using scanning electron microscopy (SEM) showed that the maximum thickness values are concentrated in the center of the "hot spot." This area coincides with the zones of maximum normal and tangential stress components of the oscillations. Moving several hundred micrometers away from the center, the thickness of the amorphous layer gradually decreases, forming a gradient that transitions into a zone less protected from deformation impact. A significant heterogeneity of the layer thickness was revealed in the cross-section of the surface. In particular, two local maxima of thickness were recorded along the diagonals of the "hot zone." This phenomenon is explained by the phase-heterogeneous superposition effect of mechanical and electromagnetic pulses, which leads to the appearance of two peaks of energy concentration where a so-called "cluster resonance" is formed. This effect confirms the uniqueness of the dual-component MRPM mode compared to classical single-phase approaches.

The morphological features of the surface after MRPM, determined using atomic force microscopy (AFM), show an almost smooth texture. The average profile protrusion (Ra) is only about 0.03–0.05 micrometers, indicating a low level of microroughness. At the 1×1 micrometer detail level, the surface consists of small fragments lacking a crystalline ordered structure, indicating the amorphous nature of the layer. In areas distant from the center of the "hot zone," isolated shallow pits up to 0.1 micrometers deep were observed using AFM scanning. Their appearance is most likely associated with local temperature increases at the moment of impulse loading when the zone could not cool quickly enough. These pits were mainly located outside the main contour of the resonant influence, where normal and tangential oscillations interacted less intensively. A detailed analysis of the topographic descriptors in the central "hot spot" showed that the relative height dispersion was only about 10–12%. This indicates a sufficiently homogeneous structure of the amorphous layer. At the same time, in the transition zone, approximately 0.5 millimeters from the center, the height deviation increased to 25%. This increase is explained by a decrease in the amplitude of tangential oscillations and a reduction in the intensity of mechanical resonant influence.

Before MRPM, the surface hardness in the initial state (the running part of the bushing before chemical-mechanical processing) was approximately 58–60 HRC (Rockwell scale). The microstructure in this state consisted of fine-grained martensite with minor residual stresses formed after prior quenching and tempering. After performing MRPM, the hardness in the central zone of the amorphous layer increased significantly to 800–900 HV on the Vickers scale. This corresponds to approximately 62–64 HRC, demonstrating an increase in hardness by 5–7 HRC compared to the initial state. This increase in hardness indicates that the absence of a crystalline lattice and the chaotic arrangement

of atoms in the amorphous structure provide increased resistance of the material to point damage. In the zone where the thickness of the amorphous layer decreased to 0.5–0.7 micrometers, the hardness gradually decreased to 700–750 HV. This indicates a transition to an intermediate zone where the amorphous structure partially crystallizes. Further, in the layer with a thickness of 0.2–0.3 micrometers, the hardness decreased to 600–650 HV, corresponding to the main crystalline sublayer.

Detailed analysis of several samples revealed a clear correlation between the thickness of the amorphous layer and hardness: maximum hardness values coincided with the greatest layer thickness. A decrease in thickness was accompanied by a proportional reduction in hardness down to the level of the crystalline material, confirming the key role of the amorphous structure in increasing hardness. Particularly noteworthy is that in the thickness range of 0.6 to 0.8 micrometers, hardness decreased more rapidly than in the central range of 1.0–1.2 micrometers. This is explained by the fact that at a lower thickness of the amorphous layer, the load was more quickly transmitted to the crystalline sublayer, since the number of amorphous cells capable of effectively dissipating stress became insufficient. Regarding the measurement accuracy, the error in the mean hardness values in the central zone was about $\pm 2\text{--}3\%$, while in the transitional zone it increased to $\pm 5\%$. This was due to both the non-uniform formation of the amorphous layer and variations in the surface roughness of the sections after polishing.

Analyzing the change in the friction coefficient μ , it was found that for the untreated surface, the mean value of μ in the “shaft–bushing” pair was approximately 0.12 under mineral oil lubrication at a temperature of about 25 °C and atmospheric pressure. Such a friction level is typical for D2 steel friction pairs. After the formation of the amorphous layer as a result of MRPM, the mean value of μ for the first 10,000 revolutions decreased to 0.10–0.11. This indicates a reduction in friction by 8–10% due to a smoother topography and the presence of a hard amorphous surface, which prevents the mechanical “seizure” of microasperities. During operation up to 50,000 revolutions, the friction coefficient remained within 0.10–0.12, demonstrating stable performance of the amorphous layer. After 60,000 revolutions, when the thickness of the amorphous layer decreased to approximately 0.6 micrometers, the friction coefficient began to gradually increase, reaching values of 0.13–0.14 by 100,000 revolutions. In the final interval (150,000–200,000 revolutions), the μ value reached 0.16–0.17, approaching the initial values of the untreated surface. The standard deviation of the friction coefficient during the stable sliding period (up to 50,000 revolutions) was about 5%. In the accelerated wear zone (over 100,000 revolutions), this indicator increased to 12–15%, indicating non-uniform destruction of the amorphous layer in different samples.

Regarding the wear rate K_w , in the first interval (up to 20,000 revolutions), its value remained minimal—approximately 0.05 mm per 10,000 revolutions. This corresponds to a state where the amorphous layer still provided protection against deep microdamage. During the moderate wear period (20,000–60,000 revolutions), when the layer thickness decreased to 0.8–0.6 micrometers, the wear rate increased to 0.1–0.12 mm per 10,000 revolutions. This was due to the depletion of the layer under the influence of mechanical and thermal loads and the exposure of the crystalline material sublayer. When the thickness of the amorphous layer dropped below 0.5 micrometers, the wear rate reached 0.2–0.25 mm per 10,000 revolutions. This indicated the onset of dominant crystalline wear. At this point, microcracks and fragmentation of the surface layer were observed, leading to a rapid deterioration of tribological properties. For comparison, in the control samples without MRPM, the wear rate already at the beginning of operation exceeded 0.2 mm per 10,000 revolutions, and by 100,000 revolutions increased to 0.5 mm per 10,000 revolutions. This clearly demonstrates that the amorphous layer after MRPM provided significantly better wear protection for a certain period than the initial crystalline coating.

6. Discussion of the results.

After the formation of the amorphous layer, its thickness proves to be closely associated with the reduction of the coefficient of friction between the contacting surfaces. In particular, in the so-called “hot spots”—areas where the layer thickness reached approximately one micrometer—the surface was found to be virtually perfectly smooth, without pronounced crystalline grains or sharp defects. Such a surface, free of microasperities, significantly reduced the interaction between surfaces, which, in turn, contributed to a “self-lubricating” effect. On such an amorphous surface, there are no distinct sliding directions, since the atomic structure does not exhibit classical crystalline order. When the thickness of the amorphous layer decreased to 0.6–0.8 micrometers, the coefficient of friction began to gradually increase. This is due to the formation of a transition zone beneath the thin layer, where signs of partial crystallization already appeared. In this zone, the amorphous cells no longer performed the function of an effective barrier, and local micro-roughnesses began to interact with each other, leading to an increase in friction. In the thinnest areas, with a thickness of 0.2–0.4 micrometers, the amorphous layer was almost completely destroyed, and the surface acquired properties similar to the original crystalline structure of D2 steel. Thus, the experimental results demonstrate that the thickness of the amorphous layer directly affects the level of friction: from a minimum value at a thickness of about 1 μm to values approaching the initial ones in the case of the thinnest layers. These observations confirm the known notions about the mechanism of friction reduction due to the formation of the amorphous phase, in which there are no flat sliding directions and there is a reduced tendency for debris formation. However, our data significantly refine this concept, showing that it is not just the presence of the amorphous structure but its sufficient thickness that determines the effectiveness of friction reduction. Unlike many literature studies, which record predominantly local formation of thin layers, in our case, it was possible to clearly distinguish three zones: maximum thickness ($\sim 1 \mu\text{m}$), gradient zone

(~0.6–0.8 μm), and thin zone (<0.5 μm). Each of these zones affects the coefficient of friction differently, allowing for a more precise determination of when the transition from the “amorphous” to the “crystalline” friction mechanism occurs.

Experimental studies using different combinations of mechanical (normal) and electromagnetic (tangential) impulses made it possible to identify the optimal parameters at which the maximum thickness of the amorphous layer is achieved. The best results were observed when the power ratio between the tangential and normal components was approximately 0,7 : 1,0, and the difference in vibration frequencies was 5–7 kHz. Under these conditions, in the “hot spots,” there was a twofold increase in the rate of defect accumulation in the crystalline structure. Local heating in these areas reached an optimal level sufficient to prevent the grains from restoring an ordered lattice during cooling. This created conditions for the fastest possible formation of the amorphous phase.

A nonlinearity effect in the resonant interaction was also observed. When the amplitude of one of the components increased in the nonlinear mode, the resonance point shifted, resulting in the formation of two local zones of peak energy accumulation instead of a single classical peak. This behavior led to the emergence of two “hot spots,” accompanied by local variations in the thickness of the amorphous layer, up to its unpredictable increase in certain areas. Sometimes such nonlinear interaction led to the formation of local defects (mini-pits) when the energy impact exceeded the optimal threshold. Therefore, it is important to consider that an excessive increase in amplitude does not always lead to an increase in the thickness of the amorphous layer: at certain values, mechanisms of recrystallization and microstep formation begin to operate, which affect the uniformity of the layer.

The results of experimental studies of reliability functions showed that amorphization due to MRPM significantly affects the durability of components. In particular, the reliability function curve clearly demonstrated a threefold shift of the “50% failure point” compared to the untreated crystalline surface. This means that in practical conditions, when half of the “shaft–bushing” assemblies already require repair, the MRPM-treated elements still retain about 80% of their operational capability. Thus, this allows for significantly less frequent maintenance, reducing the downtime of equipment caused by the replacement of worn parts. An economic analysis confirmed that investments in the MRPM procedure pay off after the first usage cycle due to the increased maintenance interval. Despite the rather high cost of equipment and significant energy consumption, the profitability of implementing MRPM in medium- and large-scale production is beyond doubt. Each “shaft–bushing” in such production can obtain an amorphous layer with minimal thickness deviations, ensuring stable operating life of 600–650 hours without the need for additional repair operations.

However, despite the positive effect, attention should be paid to some limitations that affect the accuracy of experimental data and their interpretation. Firstly, the use of scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) produced an error of up to $\pm 0.05 \mu\text{m}$, which, with a total thickness of up to 0,2 μm , could lead to an error of up to 8%. Secondly, even slight deviations in the phase of normal and tangential vibrations caused local variations in the thickness of the layer, which was reflected in the heterogeneity of tribological characteristics. Thirdly, in laboratory conditions, the cooling rate after the impulse was stable, but in industrial environments, where it is difficult to ensure precise temperature control, uneven cooling is possible, which can lead to partial recrystallization of the amorphous layer.

When forming amorphous layers using single-phase methods (laser or electromagnetic treatment), the layer thickness usually does not exceed 0.7–0.8 μm . In these cases, the coefficient of friction can be reduced by only 10–15%. However, this is not enough to significantly increase the service life of components, since the maintenance interval in such studies increased by only 50–80% compared to the crystalline state. In contrast, in our studies, the application of the two-component resonant approach made it possible to achieve a layer thickness of up to 0,3 μm , which provided an almost threefold increase in service life.

The difference in our approach lies in the use of synchronized normal and tangential impulses. Unlike other researchers, who usually applied either an alternating field to the crystalline surface or exclusively mechanical vibrations, we combined these modes to create a deeper and more uniform amorphous layer. Additionally, our approach includes a multi-level analysis—from SEM/AFM studies to long-term tribological tests and “shaft–bushing” stand tests. This allowed not only to record the fact of friction reduction but also to establish a clear correlation between layer thickness, its microstructural characteristics, mechanical hardness, wear resistance, and reliability functions. Most literature sources usually investigate only one or two of these aspects, which limits the understanding of the method's effectiveness. Furthermore, our work provides recommendations for industrial integration, which include phase tuning parameters for optimal amorphization, economic calculations, and critical layer thickness limits for maintenance planning. Unlike many studies that remain at the level of laboratory recommendations, our approach is aimed at practical application in real production conditions.

7. Recommendations for further research.

It is necessary to focus on the development of an automated system for controlling and adjusting the phase shift during MRPM. The use of high-speed position sensors, electronic phase detectors, and “fast” correction will reduce the human factor and thus decrease the risk of forming irregularities and local defects.

It is recommended to conduct studies in which MRPM-treated parts will be operated under real load conditions (temperature fluctuations, presence of abrasive particles, corrosive-aggressive environment) for extended periods. This will allow an assessment of how well the amorphous layer retains its properties under harsh conditions and whether

adjustments to processing parameters are required. Experiments should also be extended to other tool steels (e.g., M2, S7), alloyed powder composites, and new composite materials (especially nanostructured mixtures). Since amorphization mechanisms depend on thermal conductivity and plasticity, the ratio of amplitudes and frequencies should be optimized for different alloys to establish universal algorithms for these classes of materials.

It is advisable to carry out more detailed calculations of the total cost of ownership (TCO), taking into account overhead costs (prolonged equipment downtime, energy costs, maintenance of the MRPM system), as well as expenses related to disposal or repair of components. This will help develop sound business cases for different industries and scales of production.

Based on the obtained data, it is advisable to develop and standardize a step-by-step technological process regulation:

- 1) surface preparation (polishing, cleaning);
- 2) selection of optimal amplitudes and vibration frequencies for the specific material;
- 3) adjustment of the phase shift between components;
- 4) control of temperature and cooling rate during each impulse;
- 5) measurement of layer thickness and hardness after each series of cycles;
- 6) criteria for terminating impulses and completing processing.

Such a regulation will minimize errors, ensure repeatability, and reduce the likelihood of local defects.

It is recommended to implement monitoring of the residual thickness of the amorphous layer in production using a portable SEM scanner or ultrasonic probe. If the thickness approaches ≈ 0.6 micrometers, it is necessary to plan for repeated MRPM or replacement of the component, as this is where a rapid increase in the coefficient of friction and wear intensity occurs. These thresholds can also serve as the basis for maintenance scheduling, helping to prevent catastrophic failures. In repair shops where "shaft-bushing" assemblies are regularly restored, separate MRPM modules equipped with mobile coils and compact piezo elements should be provided. This will enable on-site amorphization, reducing transportation costs and possible equipment downtime.

Before launching high-speed MRPM production, it is necessary to conduct training programs for engineers and operators, explaining the specifics of phase setup, data acquisition from thermocouples and strain gauges, and interpretation of SEM/AFM results. It is also advisable to create a knowledge base ("expert database") where best practices and technical nuances for different materials and processing modes can be recorded.

8. Conclusions.

The distinction of this study from previous ones lies in the comprehensive consideration of the surface amorphization process under the simultaneous action of two components of resonant vibrations: normal (perpendicular to the contact surface) and tangential (parallel to the surface). Most existing studies focused either on the influence of high-frequency tangential impulses in combination with static loads or exclusively on laser/electromagnetic single-phase processes without considering the mechanical component. In the proposed approach, a method for synchronous control of a hydraulic drive (for normal vibrations) and an electromagnetic drive (for tangential impulses) has been developed and implemented. This interaction makes it possible to achieve the effect of high-frequency local heating while simultaneously actively forming plastic deformation, which contributes to a much deeper and more homogeneous formation of the amorphous layer.

Unlike most works that propose empirical relationships of the amorphous layer thickness from individual parameters (frequency of one type of vibration or the value of the external magnetic field), a conceptual scheme is formulated here that explains how exactly normal and tangential impulses interact in resonance. An analysis of the superposition of these components was carried out, optimal power ratios P_t/P_n and frequency divergence $\Delta\omega$ were identified to achieve the maximum level of local mixing of the material lattice and the formation of an amorphous layer up to ~ 1.2 μm thick. Experimental studies demonstrated that the superposition of synchronized normal and tangential vibrations significantly enhances the formation of an amorphous layer. The uniqueness of this method lies in the fact that, at the same energy expenditure, the thickness of the amorphous layer in the two-component resonance exceeds the indicators of single-phase approaches by almost one and a half to two times. In the central "hot spots," the layer thickness reached about one micron and more, which significantly exceeded the usual values for single-phase electromagnetic or laser treatment (≈ 0.7 – 0.8 microns). This result confirms that it is precisely the coordination of the phases and amplitudes of the two vibration components that creates the most favorable conditions for the accumulation of crystal lattice defects and the rapid transition of the material to the amorphous state.

The formed amorphous layer was characterized by increased hardness (equivalent to approximately 62–64 HRC) compared to the original crystalline material (58–60 HRC). This hardness level was observed in the central areas where the layer thickness was the greatest. The gradual decrease in hardness with a decrease in the thickness of the amorphous layer confirmed the gradient structure: in the zone where the thickness exceeded 0.8 microns, the hardness remained at a high level, and approaching the limit of ≈ 0.4 – 0.5 microns, the hardness already approached the initial value. This indicates that the amorphous layer acts as a "protective barrier" to a certain depth, which allows the contact surface to exhibit increased resistance to external loads. The formation of the amorphous layer caused a decrease in the friction coefficient by approximately 8–10% during the first tens of thousands of operating cycles. This was explained by the smoother topography, the absence of crystalline grains, and the microasperity interaction. The

wear intensity during the formation period and the initial "life" of the amorphous layer was minimal (≈ 0.05 mm per 10,000 revolutions). Only after the layer thickness decreased below ≈ 0.6 microns did the wear intensity begin to increase sharply, transitioning from a "light" to an "accelerated" stage. In the untreated group, the wear intensity from the first cycles was ≈ 0.2 mm per 10,000 revolutions and continued to increase, which confirms the protective function of the amorphous layer.

Bench tests of the "shaft–bushing" assembly showed that the MRPM-treated samples were able to operate without serious signs of wear for approximately 480–600 hours (or 80,000–110,000 revolutions) before the appearance of the first microcracks and critical wear (0.1 mm). In contrast, the control samples without MRPM failed (appearance of microcracks) after 150–220 hours. Thus, the mean time between repairs in the MRPM-treated samples increased approximately threefold. The constructed reliability functions show that at the point where 50% of the samples no longer meet the criteria for trouble-free operation, the MRPM-treated samples still remain at over 80% serviceability.

A comparative analysis of the costs of traditional replacement of the "shaft–bushing" assembly and the costs of performing MRPM demonstrates significant savings. If the traditional replacement of one assembly for full resource recovery requires conditionally 1000 units of expenditure and provides approximately 200–220 hours of operation, then performing MRPM costs about 100 units and makes it possible to extend the resource to 600–620 hours. Thus, the conditional cost of one hour of trouble-free operation with MRPM is approximately 20–25 times lower than with the traditional approach. These figures indicate the high cost-effectiveness of the method, especially in large-scale serial production or costly equipment downtime. Although the study was performed on D2 steel, the obtained results indicate that the approach is generally universal and suitable for various tool and structural steels with similar mechanical and thermal properties. The key element is the adjustment of parameters (amplitudes and vibration frequencies) according to the thermal conductivity, plasticity, and heat resistance of the specific alloy. This creates the potential for scaling the technology to other materials and applications — from the defense industry to energy and heavy engineering.

Bibliography:

1. Zhang, B., Sun, L., Zhao, N., et al. (2025). Applications of laser surface treatment in gears: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09945-y>
2. Mehta, A., & Vasudev, H. (2024). Application of microwave processing in orthopedic implants. In M. K. Singh, G. Arora, S. Zafar, S. M. Rangappa, & S. Siengchin (Eds.), *Composite materials processing using microwave heating technology* (pp. 243-263). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2772-8_12
3. Pan, S., Jin, K., Wang, T., et al. (2022). Metal matrix nanocomposites in tribology: Manufacturing, performance, and mechanisms. *Friction*, 10, 1596–1634. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0572-7>
4. Vilar, R. (2021). Microstructure modification: Generation of crystal defects and phase transformations. In K. Sugioka (Ed.), *Handbook of laser micro- and nano-engineering* (pp. ??-??). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63647-0_14
5. Huang, S. L., Chen, Q. J., Ji, L., Wang, K., & Huang, G. S. (2025). Microstructure and internal friction behavior of laser 3D printed Fe-based amorphous composites. In *Fe-based amorphous alloys with high glass forming ability* (pp. 501–513). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3932-8_43
6. Chen, X., Konovalov, S., Gromov, V., & Ivanov, Y. (2021). Modifying of structure–phase states and properties of metals by concentrated energy flows. In F. X. Kärtner (Ed.), *Surface processing of light alloys subject to concentrated energy flows* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4228-6_1
7. Kumar, D. (2023). Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review. *Progress in Materials Science*, 136, Article 101106. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101106>
8. De Silvestri, S., Nisoli, M., Sansone, G., Stagira, S., & Svelto, O. (2009). Few-cycle pulses by external compression. In F. X. Kärtner (Ed.), *Few-cycle laser pulse generation and its applications* (Topics in Applied Physics, Vol. 95, pp. 67–96). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39849-3_3
9. Meng, Y., Xu, J., Ma, L., Peng, Z., & Lee, Y. T. (2022). A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*, 10, 1443–1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>
10. Pérez-Salinas, C., de Lacalle, L. N. L., del Olmo, A., & Altan, T. (2024). The relationship between the cutting-edge, tool wear, and chip formation during Inconel 718 dry cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 6001–6017. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13685-7>
11. Bhaskaranand, B., Martucci, A., Biamino, S., Ugues, D., Bondioli, F., Montanaro, L., Lombardi, M., & Fino, P. (2025). Current trends in electron beam and laser powder bed fusion additive manufacturing of copper alloys: Composition, defects, properties, and challenges. *Materials & Design*, 253, Article 113742. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113742>
12. Zhao, Y., Wang, Y., Zhang, J., et al. (2023). Ultra-strong metal/high entropy alloy nanolaminates: Utilizing size constraining effects on phase transformation. *Science China Materials*, 66, 4207–4219. <https://doi.org/10.1007/s40843-023-2623-x>

13. Roy, R. K., Premkumar, M., Sahoo, B. K., Gopala Krishna, K., Panda, A. K., Dubey, P., & Mishra, D. (2025). Impacts of powder size on amorphous-crystalline transition behaviours in gas-atomized Fe-rich alloy powders. *Powder Technology*, Article 121199. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121199>
14. Bazaluk, O., Sobolev, V., Molchanov, O., et al. (2024). Changes in the stability of coal microstructure under the influence of weak electromagnetic fields. *Scientific Reports*, 14, 1304. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51575-w>
15. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., et al. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8, 221–300. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>
16. Vogel, M. (2024). Resonant motional coupling. In *Particle confinement in Penning traps* (Vol. 126, pp. –12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55420-9_12
17. Jia, G., Chen, G., Zhang, L., Cui, J., Duan, B., Zhuang, B., Li, Y., Lu, H., Jiang, N., Nishimura, K., & Ke, P. (2024). Study of amorphous layer on CVD diamond surface induced by Ga ion implantation in focused ion beam processing. *Diamond and Related Materials*, 145, 111108. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111108>
18. Sohrabi, S., Fu, J., Li, L., Zhang, Y., Li, X., Sun, F., Ma, J., & Wang, W. H. (2024). Manufacturing of metallic glass components: Processes, structures and properties. *Progress in Materials Science*, 144, Article 101283. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101283>
19. Janahmadov, A. K. (2024). Synergetic principles and regularities of materials fracture under low-cycle fatigue conditions. *Journal of Friction and Wear*, 45, 238–244. <https://doi.org/10.3103/S1068366624700363>
20. Nguyen, D. K., Fang, T. H., & Huang, C. C. (2025). Mechanical properties of dual-phase eutectic high-entropy alloys under nano-cutting. In D. Hoang Tien, V. K. Solanki, J. Mahmud, & T. D. L. Nguyen (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing: SETSM 2024* (Proceedings in Technology Transfer). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7083-0_43
21. Li, J., Dong, L., Xie, H., Meng, W., Zhang, X., Zhang, J., & Zhao, W. (2021). Molecular dynamics simulation of nanocrack propagation mechanism of polycrystalline titanium under tension deformation in nanoscale. *Materials Today Communications*, 26, Article 101837. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101837>
22. Mastellone, M., Bolli, E., Bellucci, A., Valentini, V., Orlando, S., Lettino, A., Santagata, A., Pace, M. L., Sani, E., Polini, R., & Trucchi, D. M. (2025). Enhancing anti-reflection properties of laser nanotextured indium phosphide. *Surfaces and Interfaces*, 60, Article 106056. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2025.106056>
23. Shu, C., Zhang, S., Yao, M., Ding, P., Zhang, J., Tao, X., Zhu, X., Yu, S., Gu, Q., Hua, L., & Yao, Z. H. (2025). Heterogeneous microstructures of martensite and pearlite achieving excellent mechanical properties in high carbon chromium steel by multi-cycle flash heating treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 931, Article 148214. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148214>
24. Kovalevskyy, S., & Kovalevska, O. (2020). Magneto-resonant processing of materials. *Proceedings of Odesa Polytechnic University*, 3(62), December, 29–38. <https://doi.org/10.15276/opu.3.62.2020.04>
25. Kovalevskyy, S. V., Kovalevska, O. S., & Lupa, Y. V. (2021). Pidvysychenia ekspluatatsiynykh kharakterystyk detalei mashyn na osnovi kombinovanoho vplyvu syl'nykh mahnitnykh poliv [Enhancement of operational characteristics of machine parts by combined strong magnetic-field treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskogo derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, (39)2, 42–50. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.5>
26. Kovalevskyy, S., & Kovalevska, O. (2021). New opportunities for processing materials in strong magnetic field. *Technical Sciences and Technologies*, 4(26), 7–14. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4\(26\)-7-14](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-7-14)
27. Kovalevskyy, S. V., Kovalevska, O. S., & Sydyuk, D. M. (2024). Modeliuvannia vplyvu magneto-resonantnoi obrobky materialiv ta yii eksperymentalne pidtverdzhennia [Modeling and experimental validation of magnetic-resonant material treatment]. *Visnyk NTU "KhPI". Series: Techniques in Machine Building*, 2(10), 9–14. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2\(10\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2(10).02)

Bibliography: (transliterated):

1. Zhang, B., Sun, L., Zhao, N., et al. (2025). Applications of laser surface treatment in gears: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09945-y>
2. Mehta, A., & Vasudev, H. (2024). Application of microwave processing in orthopedic implants. In M. K. Singh, G. Arora, S. Zafar, S. M. Rangappa, & S. Siengchin (Eds.), *Composite materials processing using microwave heating technology* (pp. 243-263). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2772-8_12
3. Pan, S., Jin, K., Wang, T., et al. (2022). Metal matrix nanocomposites in tribology: Manufacturing, performance, and mechanisms. *Friction*, 10, 1596–1634. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0572-7>
4. Vilar, R. (2021). Microstructure modification: Generation of crystal defects and phase transformations. In K. Sugioka (Ed.), *Handbook of laser micro- and nano-engineering* (pp. ??-??). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63647-0_14

5. Huang, S. L., Chen, Q. J., Ji, L., Wang, K., & Huang, G. S. (2025). Microstructure and internal friction behavior of laser 3D printed Fe-based amorphous composites. In *Fe-based amorphous alloys with high glass forming ability* (pp. 501–513). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3932-8_43
6. Chen, X., Kononov, S., Gromov, V., & Ivanov, Y. (2021). Modifying of structure-phase states and properties of metals by concentrated energy flows. In F. X. Kärtner (Ed.), *Surface processing of light alloys subject to concentrated energy flows* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4228-6_1
7. Kumar, D. (2023). Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review. *Progress in Materials Science*, 136, Article 101106. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101106>
8. De Silvestri, S., Nisoli, M., Sansone, G., Stagira, S., & Svelto, O. (2009). Few-cycle pulses by external compression. In F. X. Kärtner (Ed.), *Few-cycle laser pulse generation and its applications* (Topics in Applied Physics, Vol. 95, pp. 67–96). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39849-3_3
9. Meng, Y., Xu, J., Ma, L., Peng, Z., & Lee, Y. T. (2022). A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*, 10, 1443–1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>
10. Pérez-Salinas, C., de Lacalle, L. N. L., del Olmo, A., & Altan, T. (2024). The relationship between the cutting-edge, tool wear, and chip formation during Inconel 718 dry cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 6001–6017. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13685-7>
11. Bhaskaranand, B., Martucci, A., Biamino, S., Ugues, D., Bondioli, F., Montanaro, L., Lombardi, M., & Fino, P. (2025). Current trends in electron beam and laser powder bed fusion additive manufacturing of copper alloys: Composition, defects, properties, and challenges. *Materials & Design*, 253, Article 113742. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113742>
12. Zhao, Y., Wang, Y., Zhang, J., et al. (2023). Ultra-strong metal/high entropy alloy nanolaminates: Utilizing size constraining effects on phase transformation. *Science China Materials*, 66, 4207–4219. <https://doi.org/10.1007/s40843-023-2623-x>
13. Roy, R. K., Premkumar, M., Sahoo, B. K., Gopala Krishna, K., Panda, A. K., Dubey, P., & Mishra, D. (2025). Impacts of powder size on amorphous-crystalline transition behaviours in gas-atomized Fe-rich alloy powders. *Powder Technology*, Article 121199. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121199>
14. Bazaluk, O., Sobolev, V., Molchanov, O., et al. (2024). Changes in the stability of coal microstructure under the influence of weak electromagnetic fields. *Scientific Reports*, 14, 1304. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51575-w>
15. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., et al. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8, 221–300. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>
16. Vogel, M. (2024). Resonant motional coupling. In *Particle confinement in Penning traps* (Vol. 126, pp. –12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55420-9_12
17. Jia, G., Chen, G., Zhang, L., Cui, J., Duan, B., Zhuang, B., Li, Y., Lu, H., Jiang, N., Nishimura, K., & Ke, P. (2024). Study of amorphous layer on CVD diamond surface induced by Ga ion implantation in focused ion beam processing. *Diamond and Related Materials*, 145, 111108. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111108>
18. Sohrabi, S., Fu, J., Li, L., Zhang, Y., Li, X., Sun, F., Ma, J., & Wang, W. H. (2024). Manufacturing of metallic glass components: Processes, structures and properties. *Progress in Materials Science*, 144, Article 101283. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101283>
19. Janahmadov, A. K. (2024). Synergetic principles and regularities of materials fracture under low-cycle fatigue conditions. *Journal of Friction and Wear*, 45, 238–244. <https://doi.org/10.3103/S1068366624700363>
20. Nguyen, D. K., Fang, T. H., & Huang, C. C. (2025). Mechanical properties of dual-phase eutectic high-entropy alloys under nano-cutting. In D. Hoang Tien, V. K. Solanki, J. Mahmud, & T. D. L. Nguyen (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing: SETSM 2024* (Proceedings in Technology Transfer). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7083-0_43
21. Li, J., Dong, L., Xie, H., Meng, W., Zhang, X., Zhang, J., & Zhao, W. (2021). Molecular dynamics simulation of nanocrack propagation mechanism of polycrystalline titanium under tension deformation in nanoscale. *Materials Today Communications*, 26, Article 101837. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101837>
22. Mastellone, M., Bolli, E., Bellucci, A., Valentini, V., Orlando, S., Lettino, A., Santagata, A., Pace, M. L., Sani, E., Polini, R., & Trucchi, D. M. (2025). Enhancing anti-reflection properties of laser nanotextured indium phosphide. *Surfaces and Interfaces*, 60, Article 106056. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106056>
23. Shu, C., Zhang, S., Yao, M., Ding, P., Zhang, J., Tao, X., Zhu, X., Yu, S., Gu, Q., Hua, L., & Yao, Z. H. (2025). Heterogeneous microstructures of martensite and pearlite achieving excellent mechanical properties in high carbon chromium steel by multi-cycle flash heating treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 931, Article 148214. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148214>
24. Kovalevskyy, S., & Kovalevska, O. (2020). Magneto resonant processing of materials. *Proceedings of Odesa Polytechnic University*, 3(62), December, 29–38. <https://doi.org/10.15276/opu.3.62.2020.04>
25. Kovalevskyy, S. V., Kovalevska, O. S., & Lupa, Y. V. (2021). Pidvyshchennia ekspluatatsiynykh kharakterystyk detalei mashyn na osnovi kombinovanoho vplyvu syl'nykh mahnitnykh poliv [Enhancement

- of operational characteristics of machine parts by combined strong magnetic-field treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskogo derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, (39)2, 42–50. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.5>
26. Kovalevsky, S., & Kovalevska, O. (2021). New opportunities for processing materials in strong magnetic field. *Technical Sciences and Technologies*, 4(26), 7–14. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4\(26\)-7-14](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-7-14)
27. Kovalevsky, S. V., Kovalevska, O. S., & Sydyuk, D. M. (2024). Modeliuvannia vplyvu magneto-resonantnoi obrobky materialiv ta yii eksperymentalne pidtverdzhennia [Modeling and experimental validation of magnetic-resonant material treatment]. *Visnyk NTU "KhPI". Series: Techniques in Machine Building*, 2(10), 9–14. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2\(10\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2(10).02)

Received (надійшла) 10.11.2025

About the Authors / Відомості про авторів

Kovalevsky 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. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

НОВІКОВ Ф. В., ЖОВТОВРЮХ В. О.

МЕТОДОЛОГІЯ АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ТА НАПРУЖЕННЯ РІЗАННЯ, УМОВИ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ

Метою дослідження є аналітичне визначення сили різання та напруження різання лезовими інструментами та умов їх зменшення на основі наукових положень опору матеріалів щодо методів розрахунку елементів конструкцій на міцність. Для цього аналітично встановлено максимальне тангенціальне напруження, що виникає в умовній площині зсуву оброблюваного матеріалу під дією сили різання, яка залежить від умов тертя стружки, що утворюється, із передньою поверхнею різального інструменту. За умов досягнення в зоні різання тангенціальними та нормальними напруженнями меж міцності на зсув і стиск оброблюваного матеріалу, аналітично визначено силу різання, її тангенціальну і радіальну складові, умовне напруження різання (енергоємність обробки), коефіцієнт різання. Розрахунками встановлено, що основною умовою зменшення сили різання та умовного напруження різання є збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, який змінюється в межах $0...45^\circ$. Це досягається через зменшення коефіцієнта тертя в зоні різання, збільшення позитивного переднього кута різального інструменту. Розрахунками також встановлено, що традиційно застосований параметр – коефіцієнт усадки стружки, який може змінюватися в межах $1...8$, дорівнює відношенню умовного напруження різання та межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу. За даними експериментальних досліджень, розходження цих величин знаходиться в межах 10%, що вказує на достовірність отриманих в роботі теоретичних рішень та можливість їх практичного застосування. Це дозволяє аналітично визначити силу різання і умовне напруження різання (енергоємність обробки) та науково обґрунтовано підходити до вибору основних напрямів їх зменшення, що має важливе значення під час розроблення прогресивних технологічних процесів обробки матеріалів різанням сучасними різальними інструментами на металорізальних верстатах із числовим програмним управлінням типу "обробний центр".

Ключові слова: ріжучий інструмент, тангенціальне та нормальне напруження, енергоємність обробки, коефіцієнт усадки стружки, оброблюваний матеріал

NOVIKOV F., ZHOVTOBRYUKH V.

METHODOLOGY OF ANALYTICAL DETERMINATION OF CUTTING FORCE AND CUTTING STRESS, CONDITIONS FOR THEIR REDUCTION

The purpose of the study is to analytically determine the cutting force and cutting stress by blade tools and the conditions for their reduction based on the scientific provisions of the resistance of materials regarding the methods of calculating structural elements for strength. For this purpose, the maximum tangential stress that occurs in the conditional shear plane of the processed material under the action of the cutting force, which depends on the friction conditions of the formed chip with the front surface of the cutting tool, was analytically determined. Provided that the shear and compression strength limits of the processed material are reached in the cutting zone by tangential and normal stresses, the cutting force, its tangential and radial components, the conditional cutting stress (processing energy intensity), and the cutting coefficient were analytically determined. The calculations established that the main condition for reducing the cutting force and conditional cutting stress is an increase in the conditional shear angle of the processed material, which varies within $0...45^\circ$. This is achieved by reducing the friction coefficient in the cutting zone, increasing the positive rake angle of the cutting tool. Calculations also established that the traditionally used parameter - the chip shrinkage coefficient, which can vary within $1...8$, is equal to the ratio of the conditional cutting stress and the compressive strength of the processed material. According to experimental studies, the difference between these values is within 10%, which indicates the reliability of the theoretical solutions obtained in the work and the possibility of their practical application. This allows analytically determining the cutting force and conditional cutting stress (processing energy intensity) and scientifically based approach to the choice of the main directions of their reduction, which is of great importance when developing progressive technological processes for processing materials by cutting with modern cutting tools on metal-cutting machines with numerical program control of the "machining center" type.

Keywords: cutting tool, tangential and normal stress, machining energy intensity, chip shrinkage coefficient, machined material

Вступ. Процеси обробки матеріалів різанням набули широкого застосування у виробництві різноманітної продукції, особливо, у таких наукомістких галузях, як авіаційна та автомобільна промисловість, медицина тощо. Це пов'язано з високими вимогами до якості, точності і продуктивності обробки високоміцних важкооброблюваних матеріалів, які використовують під час виробництва сучасних машин і систем. Тому і до процесів обробки матеріалів різанням пред'являються високі вимоги з погляду суттєвого зниження силової і теплової напруженості, забезпечення високопродуктивної та високоякісної обробки. Все це вимагає значного підвищення ефективності процесів обробки матеріалів різанням на основі наукових положень технічної механіки і, особливо, опору матеріалів щодо методів розрахунку елементів конструкцій на міцність. Однак, незважаючи на дуже значний час розвитку процесів обробки матеріалів різанням, і зараз ці методи ще не отримали практичного втілення, оскільки відсутні достатньо досконалі аналітичні підходи до проєктування та проведення структурної і параметричної оптимізації технологічних процесів. Розрахунки технологічних параметрів виконуються із застосуванням в основному експериментальних даних, а це не дозволяє повною мірою виявити та обґрунтувати оптимальні варіанти прийняття технологічних рішень щодо вибору раціональних параметрів обробки. Виходячи з цього, в роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання розроблення методології аналітичного визначення сили різання та напруження різання лезовими інструментами та умов їх суттєвого зменшення, що є важливим для створення прогресивних технологічних процесів обробки матеріалів різанням.

Аналіз основних досягнень та літератури. Основним сучасним досягненням в розвитку процесів обробки матеріалів різанням є розроблені високопродуктивні методи високошвидкісного різання із застосування нових поколінь лезових різальних твердосплавних і керамічних інструментів та металорізальних верстатів із числовим програмним управлінням типу "обробний центр". За умов ефективного застосування вони дозволяють підвищити продуктивність обробки до 10 і більше разів із одночасним забезпеченням високих показників якості, точності і собівартості обробки. Однак досягти таких високих показників обробки на

практиці вдається не завжди. Це пов'язано, головним чином, із недостатнім техніко-економічним обґрунтуванням оптимальних умов обробки. Тому в сучасних роботах [1–3] значну увагу приділено цьому питанню. У результаті обґрунтовано перспективні напрями підвищення ефективності механічної обробки лезовими інструментами на різних технологічних операціях. У роботі [4] показано ефективність застосування в механообробці ріжучих інструментів із надтвердих матеріалів. У роботі [5] наведено важливі теоретичні рішення щодо можливостей зменшення сили та температури різання в умовах високошвидкісної обробки, що дозволило розробити та впровадити у виробництво сучасні технології високопродуктивної механічної обробки лезовими інструментами складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Питанням вибору оптимальних умов механічної обробки різанням присвячено роботи Гусарєва В. С. [6, 7], в яких показано важливість аналізу умов зменшення енергоємності обробки, що визначають напрями зменшення сили і температури різання та підвищення параметрів якості, точності і продуктивності обробки. При цьому вказано на значні труднощі щодо аналітичного визначення сили різання та енергоємності обробки. У роботах [8, 9] також розглянуто питання зменшення сили різання та енергоємності обробки, однак з погляду їх експериментального встановлення. Отже, наведені роботи вказують на необхідність аналітичного встановлення сили різання та напруження різання для подальшого виявлення найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності процесу різання.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є аналітичне визначення сили різання та напруження різання лезовими інструментами та умов їх зменшення на основі наукових положень опору матеріалів щодо методів розрахунків елементів конструкцій на міцність.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити методологію аналітичного визначення сили різання та напруження різання за умови досягнення в зоні різання тангенціальними та нормальними напруженнями меж міцності на зсув і стиск оброблюваного матеріалу;
- аналітично визначити та обґрунтувати напрями зменшення сили різання та умовного напруження різання за різних умов обробки лезовими інструментами;
- аналітично встановити зв'язок сили різання та умовного напруження різання із традиційно застосовуваним параметром – коефіцієнтом усадки стружки;
- експериментально оцінити достовірність отриманих теоретичних рішень, особливо, щодо встановленого зв'язку між силою різання та, відповідно, умовним напруженням різання і коефіцієнтом усадки стружки.

Матеріали дослідження. Для досягнення поставленої мети розглянемо розрахункову схему умов руйнування прямолінійного зразка під дією зосередженої поздовжньої сили стиску на основі наукових положень опору матеріалів.

Тангенціальне напруження, що виникає в умовній площині зсуву матеріалу зразка під дією зосередженої поздовжньої сили стиску P (рис. 1,а), дорівнює:

$$\tau = \frac{P \cdot \cos \beta}{l \cdot \epsilon} = \frac{P \cdot \cos \beta}{a \cdot \epsilon} \cdot \sin \beta = \frac{P \cdot \sin 2\beta}{2 \cdot a \cdot \epsilon}, \quad (1)$$

де a , ϵ – товщина і ширина зрізу, м; $l = a / \sin \beta$ – довжина умовної площини зсуву матеріалу зразка, м; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу.

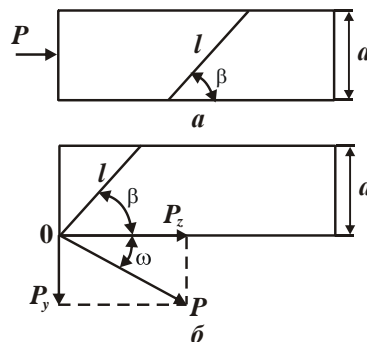


Рис. 1 – Розрахункові схеми умов руйнування прямолінійного зразка під дією зосередженої сили стиску P під кутом $\omega = 0$ (а) і під кутом $\omega > 0$ (б)

Максимальне тангенціальне напруження τ_{max} досягається за умови $\sin 2\beta = 1$ або $2\beta = 90^0$. Відповідно, $\beta = 45^0$. Тоді $\tau_{max} = P / (2 \cdot a \cdot \epsilon)$.

За умови $\tau_{max} = \tau_{зсцв}$, маємо: $P = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{зсцв} = a \cdot b \cdot \sigma_{cm}$, де $\tau_{зсцв}$, σ_{cm} – відповідно, межі міцності на зсув і стиск матеріалу зразка, Н/м².

Нормальне напруження дорівнює $\sigma = P / (a \cdot b) = \sigma_{cm}$. Отже, руйнування зразка відбувається під кутом $\beta = 45^0$ за умови досягнення межі міцності на стиск матеріалу зразка σ_{cm} , що відповідає відомим експериментальним даним [10].

Розглянемо тепер випадок, коли сила стиску P діє на зразок під деяким кутом ω (рис. 1,б).

Тангенціальне напруження, що виникає в умовній площині зсуву матеріалу зразка, від дії зосередженої сили P (рис. 1, б) в цьому випадку визначається:

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \omega)}{a \cdot b} \cdot \sin \beta = \frac{P}{2 \cdot a \cdot b} \cdot [\sin(2 \cdot \beta + \omega) - \sin \omega]. \quad (2)$$

Максимальне значення тангенціального напруження τ_{max} досягається за умови $\sin(2 \cdot \beta + \omega) = 1$ або $(2 \cdot \beta + \omega) = 90^0$. Відповідно, $\beta = 45^0 - \omega / 2$.

Як видно, зі збільшенням кута ω умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β зменшується аж до нуля, що відрізняє даний випадок руйнування прямолінійного зразку під дією сили стиску P (рис. 1,б) від попереднього випадку (рис. 1,а). У результаті максимальне тангенціальне напруження τ_{max} визначається залежністю:

$$\tau_{max} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot b} \cdot (1 - \sin \omega). \quad (3)$$

Звідки, за умови $\tau_{max} = \tau_{зсцв} \approx 0,5 \cdot \sigma_{cm}$, можна визначити силу стиску P :

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{зсцв}}{(1 - \sin \omega)} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{(1 - \sin \omega)}. \quad (4)$$

У даному випадку сила стиску P збільшується зі збільшенням кута ω . При досягненні кута $\omega = 90^0$ сила $P \rightarrow \infty$. Це пов'язано з тим, що сила P спрямована вертикально вниз. Дана умова є найважливішою умовою забезпечення високої міцності конструкцій виробів, що працюють під дією значних механічних навантажень, оскільки для руйнування виробу необхідно докласти велику силу P . Однак дана умова є найгіршою умовою для здійснення процесу різання, оскільки за досягнення кута $\omega = 90^0$ максимальне тангенціальне напруження, що виникає в умовній площині зсуву оброблюваного матеріалу, приймає нульове значення ($\tau_{max} \rightarrow 0$). Відділення стружки в цьому випадку не відбувається, оскільки умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta \rightarrow 0$, а для забезпечення умови стружкоутворення необхідно, щоб кут β був більший за нуль і змінювався в межах $0 < \beta < 45^0$.

Найкращою умовою стружкоутворення під час різання є умова: $\beta \rightarrow 45^0$. Однак, реалізувати її, як показала практика обробки матеріалів різанням, фактично неможливо, оскільки неможливо досягти значення кута $\omega \rightarrow 0$ та реалізувати схему навантаження зразка, показаного на рис. 1,а.

Що ж обмежує виконання цієї умови у процесі різання? На відміну від статичних умов навантаження механічних систем, у процесі різання безперервне відділення стружки від основної маси оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок тертя оброблюваного матеріалу з передньою поверхнею ріжучого інструменту, тобто стружка сходить із зони різання вздовж передньої поверхні ріжучого інструменту. У результаті в процесі різання, поруч із виникненням тангенціальної складової сили різання P_z , яка, власне, формується внаслідок переміщення оброблюваного виробу чи ріжучого інструменту, виникає ще й радіальна складова сили різання P_y .

Якщо розглядати передній кут різального інструмента рівним нулю, то між складовими сили різання P_z і P_y існує зв'язок (рис 1,б): $P_y / P_z = \tan \omega = f$, де f – коефіцієнт тертя передньої поверхні різального інструменту з оброблюваним матеріалом. У цьому випадку кут ω дорівнює умовному куту тертя оброблюваного матеріалу з передньою поверхнею ріжучого інструменту ψ ($\tan \psi = f$).

Оскільки $f < 1$, то відношення $P_z / P_y = \cot \omega = \cot \psi = 1 / f > 1$. Це узгоджується з відомими експериментальними даними [8]. За умови $\psi \rightarrow 0$ виконується умова $P_z / P_y \rightarrow \infty$, що відповідає значенню кута $\omega \rightarrow 0$ та визначає шляхи максимального використання потенційних можливостей процесу різання.

Якщо розглядати передній кут ріжучого інструменту γ більше нуля (позитивним), то з фізичної точки зору він зменшує умовний кут тертя оброблюваного матеріалу з передньою поверхнею ріжучого інструменту ψ . У результаті кут ω визначається $\omega = \psi - \gamma$. Тоді кут $\beta = 45^0 - (\psi - \gamma) / 2$.

За умови $\gamma \rightarrow \psi$ кут $\omega \rightarrow 0$ і з'являється можливість реалізації схеми навантаження зразка, яку представлено на рис. 1,а (без наявності несприятливого тертя на передній поверхні різального інструменту). Цим можна пояснити прагнення на практиці збільшувати позитивний передній кут на ріжучому інструменті до значення $\gamma = 30^\circ$ і більше, щоб досягти умову $\omega \rightarrow 0$. Однак, такий же результат можна отримати, якщо зменшити коефіцієнт тертя f на передній поверхні ріжучого інструменту. Тоді передній кут γ можна зменшити до нульового та навіть негативного значення, що позитивно позначиться на стійкості та працездатності ріжучого інструменту.

Це узгоджується з практикою застосування різальних лезових алмазних інструментів, що характеризуються невеликим коефіцієнтом тертя [4]. У даному випадку передній кут інструменту, як правило, встановлюють рівним $\gamma = 0 \dots -1^\circ$, що одночасно забезпечує зменшення силової напруженості процесу різання та високу стійкість ріжучого інструменту.

Цим можна пояснити ефективність застосування абразивних інструментів у процесі різання, які, маючи невеликий коефіцієнт тертя f (особливо, алмазно-абразивні інструменти) дозволяють здійснювати ефективну обробку за наявності значних негативних передніх кутів на ріжучих абразивних або алмазних зернах. Однак, при цьому необхідно враховувати те, що абразивні інструменти працюють в умовах інтенсивного тертя оброблюваного матеріалу зі зв'язкою інструменту, а це призводить до збільшення силової і теплової напруженості процесу різання та можливої появи припикань, мікротріщин та інших температурних та механічних дефектів на оброблених поверхнях, тобто до зниження якості обробки. Отже, виникаючі несприятливі явища під час абразивної обробки (шліфуванні) пов'язані, першою чергою, не з негативними передніми кутами ріжучих зерен, а з наявністю інтенсивного тертя зв'язки абразивного інструменту з оброблюваним матеріалом.

Таким чином, з урахуванням кута $\omega = \psi - \gamma$ і кута $\beta = 45^\circ - \omega/2$ залежність (3) набуває вигляду:

$$\tau_{max} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot b} \cdot [1 - \cos(90^\circ - \omega)] = \frac{P}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(45^\circ - \frac{\omega}{2}\right) = \frac{P}{a \cdot b} \cdot \sin^2 \beta. \quad (5)$$

З урахуванням співвідношення $\tau_{max} = \tau_{зсув} \approx 0,5 \cdot \sigma_{cm}$, маємо:

$$P = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{2 \cdot \sin^2 \beta}. \quad (6)$$

Як видно, чим більше умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , тим менше сила різання P і вище ефективність процесу різання.

Тангенціальна складова сили різання P_z з урахуванням залежностей (4) і (6) визначиться:

$$P_z = P \cdot \cos(\psi - \gamma) = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \cos(90^\circ - 2 \cdot \beta)}{2 \cdot \sin^2 \beta} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \sin 2\beta}{2 \cdot \sin^2 \beta} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (7)$$

Виходячи із залежності (7), тангенціальна складова сили різання P_z змінюється аналогічно силі різання P : зі збільшенням кута β безперервно зменшується.

Умове напруження різання (енергоємність обробки) $\sigma = P_z / (a \cdot b)$, виходячі із залежності (7), приймає вигляд:

$$\sigma = \frac{\sigma_{cm}}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (8)$$

У результаті прийшли до дуже простої залежності, згідно якої величини σ і σ_{cm} пов'язані між собою лише функцією $\operatorname{tg} \beta$. Чим більше кут β , тим менше величина σ . Відповідно, відношення $\sigma / \sigma_{cm} = \operatorname{ctg} \beta$. Оскільки кут β змінюється в межах $0 < \beta < 45^\circ$, то відношення $\sigma / \sigma_{cm} = \operatorname{ctg} \beta$ завжди більше одиниці і лише за умови $\beta \rightarrow 45^\circ$ наближається до одиниці.

Отже відношення $\sigma / \sigma_{cm} = \operatorname{ctg} \beta$ в залежності від кута β змінюється в межах від нескінченності до одиниці. Очевидно, в умовах абразивної обробки відношення $\sigma / \sigma_{cm} = \operatorname{ctg} \beta$ приймає значно більші значення, ніж в умовах обробки лезовими інструментами. Таким чином, залежність (8) однозначно визначає фізичну сутність процесу різання і справедлива як для умов обробки лезовими інструментами, так і абразивними інструментами.

Коефіцієнт різання $K_{piz} = P_z / P_y$, відповідно до розрахункової схеми, показаної на рис. 1,а, визначається:

$$K_{piz} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{P \cdot \cos \omega}{P \cdot \sin \omega} = \operatorname{ctg} \omega = \operatorname{ctg}(90^\circ - 2\beta) = \operatorname{tg} 2\beta. \quad (9)$$

Оскільки умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β змінюється в межах $0 \dots 45^\circ$, то коефіцієнт різання $K_{pi3} = P_z / P_y$ змінюється в межах $0 \dots \infty$. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що кут β протилежно впливає на коефіцієнт різання $K_{pi3} = P_z / P_y = tg2\beta$ і відношення $\sigma / \sigma_{cm} = ctg\beta$: чим більше $K_{pi3} = P_z / P_y$, тим менше σ / σ_{cm} , а також енергоємність обробки, що відповідає відомим експериментальним даним [6, 11].

У табл. 1 наведено розрахункові значення функції $tg\beta$, що входить до залежності (7), та функції $tg2\beta = K_{pi3}$ зі зміною умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β .

Таблиця 1 – Розрахункові значення функцій $tg\beta$ і $tg2\beta$

β , градус	0	10	20	30	40	45
$tg\beta$	0	0,176	0,364	0,577	0,839	1,0
$tg2\beta$	0	0,364	0,839	1,732	5,671	∞

Порівнюючи значення $tg\beta$ і $tg2\beta$, можна бачити, що $tg2\beta \gg tg\beta$, особливо, за умови $\beta > 20^\circ$, коли функція $tg2\beta > 1$ і досягає нескінченного значення (за умови $\beta = 45^\circ$).

Для встановлення зв'язку тангенціальної складової сили різання P_z та умовного напруження різання (енергоємності обробки) σ з коефіцієнтом різання $K_{pi3} = P_z / P_y$, слід виразити аналітично в залежності (7) функцію $tg\beta$ через функцію $tg2\beta = K_{pi3}$. Для цього скористаємося відомою тригонометричною залежністю

$$tg2\beta = \frac{2 \cdot tg\beta}{1 - tg^2\beta}, \text{ яку можна подати у вигляді квадратного рівняння відносно невідомої функції } tg\beta:$$

$$tg^2\beta + \frac{2}{tg2\beta} \cdot tg\beta - 1 = 0. \quad (10)$$

Рішення квадратного рівняння (10):

$$tg\beta = \frac{tg2\beta}{\sqrt{1 + tg^2 2\beta} + 1} = \frac{K_{pi3}}{\sqrt{1 + K_{pi3}^2} + 1}. \quad (11)$$

Після підстановки залежності (11) у залежність (7), маємо:

$$P_z = \frac{a \cdot \epsilon \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right). \quad (12)$$

За умови $K_{pi3} > 1$, що виконується під час лезової обробки, залежність (12) приймає вигляд: $P_z = a \cdot \epsilon \cdot \sigma_{cm}$, згідно якому тангенціальна складова сили різання P_z фактично не залежить від коефіцієнта різання K_{pi3} та приймає сталі значення. У цьому випадку умовне напруження різання (енергоємність обробки) дорівнює $\sigma = P / (a \cdot \epsilon) = \sigma_{cm}$, тобто фактично дорівнює межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу σ_{cm} . Це вказує на те, що фактично досягаються умови руйнування оброблюваного матеріалу під дією сили стиску за розрахунковою схемою, показаною на рис. 1,а, тобто виконується умова $\omega = 0$.

У загальному випадку умовне напруження різання (енергоємність обробки) σ , виходячи із залежності (12), приймає вигляд:

$$\sigma = \frac{\sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right). \quad (13)$$

Із залежності (13) випливає, що умовне напруження різання σ зі зміною коефіцієнта різання K_{pi3} змінюється аналогічно зміні тангенціальної складової сили різання P_z : асимптотичне зменшується до значення σ_{cm} , що відповідає умові $K_{pi3} \rightarrow \infty$. За умови $K_{pi3} \rightarrow 0$ величина $\sigma \rightarrow \infty$. Отже, під час абразивної обробки, коли $K_{pi3} < 1$, величина σ приймає значення, які значно більше σ_{cm} , а під час лезової обробки, коли $K_{pi3} > 1$, приймає значення, які близькі до σ_{cm} . Звідси, з погляду зменшення силової напруженості процесу різання, впливає ефективність застосування обробки лезовими інструментами, що однозначно підтверджується експериментальними даними [1].

Радіальна складова сили різання P_y аналітично описується:

$$P_y = \frac{P_z}{K_{pi3}} = \frac{P_z}{tg 2\beta} = \frac{a \cdot \sigma_{cm}}{tg\beta \cdot tg 2\beta} \quad (14)$$

або із урахуванням залежності (12):

$$P_y = \frac{a \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right). \quad (15)$$

Аналогічно параметрам P_z і σ , радіальна складова сили різання P_y зі збільшенням умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β і коефіцієнта різання K_{pi3} асимптотично зменшується до нульового значення, оскільки $tg 2\beta \rightarrow \infty$. Таку умову можна реалізувати під час обробки лезовими інструментами, коли $\beta \rightarrow 45^\circ$.

Функцію $tg\beta$, яка входить у наведені розрахункові залежності, можна виразити відомою формулою Тіме А. М. [2]:

$$tg\beta = \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}, \quad (16)$$

де K_L – коефіцієнт усадки стружки або укорочення стружки, що визначається експериментально ($K_L \geq 1$).

Залежність (16) відображає сутність умов деформування оброблюваного матеріалу в процесі різання. Чим більше коефіцієнт усадки стружки або укорочення стружки K_L , тим менше умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β .

Із урахуванням залежності (16) умовне напруження різання (енергоємність обробки) σ приймає вигляд:

$$\sigma = \sigma_{cm} \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (17)$$

Як видно, зі збільшенням коефіцієнта усадки стружки K_L функція $tg\beta$ зменшується, що вказує на зменшення кута β і, відповідно, збільшення умовного напруження різання (енергоємності обробки) σ .

Для нульового переднього кута інструмента ($\sin \gamma = 0$; $\cos \gamma = 1$) справедливе відношення $K_L = 1/tg\beta$. Тоді $\sigma = \sigma_{cm} \cdot K_L = \sigma_{cm} / tg\beta$. У результаті прийшли до залежності (8): умовне напруження різання σ прямо пропорційне пов'язане з коефіцієнтом усадки стружки K_L . Більшим значенням σ відповідають більші значення K_L .

За суттю, коефіцієнт усадки стружки K_L визначає, у скільки разів умовне напруження різання σ перевищує межу міцності на стиск оброблюваного матеріалу σ_{cm} . Виходячи із цього, основною умовою зменшення умовного напруження різання σ є зменшення коефіцієнта усадки стружки K_L .

Оскільки коефіцієнт усадки стружки K_L дорівнює відношенню $\sigma / \sigma_{cm} = ctg\beta$, то це відкриває нові можливості для аналізу фізичної сутності процесу різання. Знаючи величину K_L , за залежністю (16) нескладно визначити умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β та в подальшому, за наведеними в роботі аналітичними залежностями, визначити умовне напруження різання (енергоємність обробки) σ , відношення $\sigma / \sigma_{cm} = ctg\beta$, коефіцієнт різання K_{pi3} , силу різання P та її складові P_z і P_y .

Із залежності (13) також випливає, що збільшення коефіцієнта усадки стружки K_L обумовлене зменшенням коефіцієнта різання $K_{pi3} < 1$. Тоді залежність (13) з урахуванням залежності (17) для нульового переднього кута ріжучого інструмента можна виразити так:

$$K_L = \frac{1}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right). \quad (18)$$

У табл. 2 наведено розраховані на основі залежності (18) значення коефіцієнта усадки стружки K_L .

Таблиця 2 – Розрахункові значення коефіцієнта усадки стружки K_L

K_{pi3}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	2	5
K_L	∞	20	10	6,8	5,2	4,2	3,2	2,4	1,6	1,2

Зі збільшенням коефіцієнта різання K_{pi3} коефіцієнт усадки стружки K_L зменшується. Як відомо [8], під час точіння коефіцієнт усадки стружки K_L може змінюватися в межах 1 ... 8. Отже, за цих умов коефіцієнт різання K_{pi3} може приймати значення $K_{pi3} < 1$ і $K_{pi3} > 1$. За умови $K_{pi3} < 1$ коефіцієнт усадки стружки K_L значно збільшується. Тому для його зменшення та підвищення ефективності обробки необхідно реалізувати

умови збільшення коефіцієнта різання $K_{piz} > 1$ шляхом зменшення радіальної складової сили різання P_y , обумовленої тертям стружки з передньою поверхнею різця. Це досягається зменшенням коефіцієнта тертя f , збільшенням позитивного переднього кута інструменту γ та забезпеченням високої гостроти його леза, забезпеченням умов дроблення стружки в зоні різання або зміною кута сходу стружки з передньої поверхні інструменту, застосовуючи для цього умови косокутного різання тощо [12].

Для підтвердження отриманих теоретичних рішень в табл. 3 наведено експериментальні значення коефіцієнта усадки стружки K_L в залежності від швидкості різання V під час точіння заготовок із загартованої сталі 45 різцями із ельбору-Р за умов обробки: подача $S = 0,04$ мм/об; глибина різання $t = 0,2$ мм [8]. В табл. 3 також наведено розрахункові значення параметрів β , $K_{piz} = tg 2\beta$, $\sigma / \sigma_{cm} = 1 / tg\beta$, функції $tg\beta$.

Таблиця 3 – Значення параметрів K_L , β , $K_{piz} = tg 2\beta$, $\sigma / \sigma_{cm} = 1 / tg\beta$, функції $tg\beta$

V , м/хв	50	100	150	200	250	300
K_L	3,0	3,0	2,7	2,5	2,4	2,3
β , градус	17,0	17,0	19,0	20,5	22,0	22,5
$tg\beta$	0,3057	0,3057	0,3443	0,3805	0,404	0,421
$K_{piz} = tg 2\beta$	0,6745	0,6745	0,7813	0,8693	0,9657	1,0
$\sigma / \sigma_{cm} = 1 / tg\beta$	3,271	3,271	2,9	2,755	2,48	2,44

Як видно, зі збільшенням швидкості різання V коефіцієнт усадки стружки K_L зменшується, а умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , навпаки, збільшується, що вказує на зменшення силової напруженості процесу різання. При цьому величини K_L і $\sigma / \sigma_{cm} = 1 / tg\beta$ незначно відрізняються (в межах 10 %). Це підтверджує достовірність отриманих теоретичних рішень та можливість їх застосування під час розроблення прогресивних технологічних процесів обробки матеріалів різанням сучасними різальними інструментами на металорізальних верстатах із числовим програмним управлінням типу "обробний центр" [13].

Висновки. У роботі розроблено методологію аналітичного визначення сили різання та напруження різання лезовими інструментами та умов їх зменшення на основі наукових положень опору матеріалів щодо методів розрахунків елементів конструкцій на міцність. Для цього аналітично встановлено максимальне тангенціальне напруження, що виникає в умовній площині зсуву оброблюваного матеріалу під дією сили різання, яка залежить від умов тертя стружки, що утворюється, із передньою поверхнею різального інструменту. За умови досягнення в зоні різання тангенціальними та нормальними напруженнями меж міцності на зсув і стиск оброблюваного матеріалу, аналітично визначено силу різання, її тангенціальну і радіальну складові, умовне напруження різання (енергоємність обробки), коефіцієнт різання. Розрахунками встановлено, що основною умовою зменшення параметрів силової напруженості процесу різання є збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, який змінюється в межах $0 \dots 45^\circ$. Це досягається через зменшення коефіцієнта тертя в зоні різання, збільшення позитивного переднього кута різального інструменту. Розрахунками також встановлено, що традиційно застосовуваний параметр – коефіцієнт усадки стружки, який може змінюватися в межах $1 \dots 8$, дорівнює відношенню умовного напруження різання та межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу. За даними експериментальних досліджень, розходження цих величин знаходиться в межах 10%, що вказує на достовірність отриманих в роботі теоретичних рішень та можливість їх практичного застосування. Це дозволяє аналітично визначити сили різання і умовне напруження різання (енергоємність обробки) та науково обґрунтовано підійти до вибору напрямів їх зменшення, що має важливе значення під час розроблення прогресивних технологічних процесів обробки матеріалів різанням сучасними різальними інструментами на металорізальних верстатах із числовим програмним управлінням типу "обробний центр".

Список літератури:

1. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина и др.; под ред. С. А. Клименко. Киев: ИСМ имени В. Н. Бакуля, 2018. 304 с.
2. 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.
3. Шелковой А., Ключко А., Набока Е. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 528 с.
4. Лавріненко В. І., Новіков М. В. Надтверді матеріали в механообробці / за ред. М. В. Новікова. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
5. Полянский В. И. Теоретическое обоснование условий уменьшения силовой и тепловой напряженности механической обработки. Захист металургійних машин від поломок : Збірник наук. праць. Маріуполь: ДВНЗ "ГДТУ", 2011. Вип. 13. С. 188–192.
6. Гусарев В. С., Яровий Ю. В. Дослідження питомої роботи формування при точінні. Праці Одеського політехнічного університету. Одеса: ОНПУ, 2010. Вип. 1(33) – 2(34). 61–65.

7. Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Гусарев В. С., Наддачин В. Б., Якимов А. А., Андिलाхай А. А., Сергеев А. С., Новиков Д. Ф. Инновационное развитие современных технологий : монография. Днепр : ЛИРА, 2021. 480 с.
8. Коломиец В. В. Точение закаленных сталей резцами из эльбора-Р. Том 3 "Резание материалов лезвийными инструментами", часть 2, глава 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Одесса: ОНПУ, 2003. С. 157–226.
9. Зубарь В. П., Тимчук А. Г., Чопенко М. В. Лезвийная обработка закаленных сталей и чугунов взамен шлифования. Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць. Харків: НТУ "ХПІ". Вип. 5. 2010. С. 32–38.
10. Чихладзе Е. Д. Опір матеріалів. Харків: УкрДАЗТ, 2002. 362 с.
11. Novikov F., Polyansky V., Shkurupiy V., Novikov D., Hutorov A., Ponomarenko Ye., Yermolenko O. O., Yermolenko O. A. Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering Technological Systems. 2019. Vol. 6. No. 1(102). Pp. 41–50. DOI: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/183882>
12. Якимов О. В., Марчук В. І., Лінчевський П. А., Якимов О. О., Ларшин В. П. Технологія машино- та приладобудування : підручник. Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2005. 712 с.
13. Жовтобрюх В. О. Підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем шляхом вибору раціональних параметрів операцій за критерієм собівартості : автореф. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – Маріуполь, 2012. – 21 с.

Bibliography (transliterated):

1. High-performance finishing blade machining of parts made of high-hardness steels / S. A. Klimentko, A. S. Manokhin, M. Yu. Kopeikina et al.; edited by S. A. Klimentko. Kyiv: ISM named after V. N. Bakul, 2018. 304 p.
2. Integrated processes of materials cutting: textbook [for higher education institutions] / A. I. Grabchenko, V. A. Zaloga, Yu. N. Vnukov et al.; edited by A. I. Grabchenko and V. A. Zaloga. Sumy: University Book, 2017. 451 p.
3. Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. (2015) Simulation modeling in mechanical assembly production problems. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing. 528.
4. Lavrinenko V. I., Novikov M. V. (2013) Superhard materials in mechanical processing / edited by M. V. Novikov. Kyiv: V. M. Bakul Institute of Metallurgy, NAS of Ukraine. 456.
5. Polyansky V. I. (2011) Theoretical substantiation of conditions for reducing the force and thermal stress of mechanical processing. Protection of metallurgical machines from breakdowns: Collection of sciences. work. Mariupol: DVNZ "PDTU". No. 13. 188–192.
6. Gusarev V. S., Yarovyi Yu. V. (2010) Research on the specific work of forming during turning. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. Odessa: ONPU. No. 1(33)–2(34). 61–65.
7. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Gusarev V. S., Naddachin V. B., Yakimov O. O., Andilakhai O. O., Serhieiev O. S., Novikov D. F. (2021) Innovative development of modern technologies: monograph. Dnepr: LIRA, 2021. 480.
8. Kolomiets V. V. (2003) Turning of hardened steels with elbor-R cutters. Volume 3 "Cutting materials with blade tools", part 2, chapter 1. Physical and mathematical theory of materials processing processes and mechanical engineering technology / edited by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. Odessa: ONPU. 157–226.
9. Zubar V. P., Timchuk A. G., Chopenko M. V. (2010) Blade processing of hardened steels and cast irons instead of grinding. Modern technologies in mechanical engineering. Collection of scientific works. Kharkiv: NTU "KhPI". No. 5. 32–38.
10. Chikhladze E. D. Resistance of materials (2002) Kharkiv: UkrDAZT. 362.
11. Novikov F. V., Polyansky V., Shkurupiy V., Novikov D., Hutorov A., Ponomarenko Ye., Yermolenko O. O., Yermolenko O. A. (2019) Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering Technological Systems. Vol. 6. No. 1(102). Pp. 41–50. DOI: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/183882>
12. Yakimov O. V., Marchuk V. I., Linchevsky P. A., Yakimov O. O., Larshin V. P. (2005) Technology of mechanical and instrument-making: textbook. Lutsk: Editorial and publishing department of LDТУ. 712
13. Zhovtobryukh V. O. (2012) Increasing the efficiency of mechanical processing of hydraulic system parts by choosing rational operation parameters based on the cost criterion: author's abstract ... candidate of technical sciences: 05.02.08. Mariupol. 21.

Надійшла (received) 02.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

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

Жовтобрюх Валерій Олексійович (Zhovtobryukh Valeriy) – кандидат технічних наук, доцент закладу вищої освіти кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у м. Кременчук; тел. +38-050-32-02-704; e-mail: td@varius.com.ua ORCID: 0009-0007-2438-6082

КОЛІСНИК К. Д.

АНАЛІЗ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ЗГИНАННЯ ОДНОРОГОГО КОВАНОГО ГАКА ВЕЛИКОЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМАХ

У роботі виконано чисельне моделювання початкового етапу згинання однорогого кованого гака великої вантажопідйомності в програмному середовищі QForm UK. Досліджено вплив температурного режиму нагріву заготовки (950–1250 °C) на характер розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень у поперечному перерізі зони найбільших деформацій. Показано, що зміна температури практично не впливає на максимальні та мінімальні значення пластичної деформації, але суттєво знижує інтенсивність напружень і робить їх розподіл більш рівномірним. Розраховано коефіцієнт нерівномірності деформації K_n , за допомогою якого встановлено, що найбільш рівномірне формоутворення забезпечують режими 950 °C та 1150 °C. Результати мають практичне значення для оптимізації температурних режимів кування і зниження ризику утворення дефектів у криволінійній частині гака.

Ключові слова: згинання гаків, пластична деформація, інтенсивність напружень, температурний режим, коефіцієнт нерівномірності, напружено-деформований стан.

KOLISNYK K.

ANALYSIS OF THE INITIAL BENDING STAGE OF A HEAVY-DUTY SINGLE-HORN FORGED HOOK UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

This study presents numerical simulation of the initial bending stage of a heavy-duty forged single-hook performed in the QForm UK software environment. The influence of the billet heating temperature (950–1250 °C) on the distribution of plastic strain and stress intensity in the cross-section of the zone with the highest deformation was investigated. The results show that temperature variation has almost no effect on the maximum and minimum values of plastic strain, but it significantly reduces the stress intensity and makes its distribution more uniform. The deformation non-uniformity coefficient (K_n) was calculated, revealing that the most uniform shape formation is achieved at 950 °C and 1150 °C. The findings are of practical importance for optimizing forging temperature regimes and reducing the risk of defect formation in the curved section of the hook.

Keywords: hook bending, plastic strain, stress intensity, temperature regime, non-uniformity coefficient, stress-strain state.

Вступ. Ковані гаки великої вантажопідйомності є відповідальними елементами вантажопідйомних механізмів, від надійності та довговічності яких безпосередньо залежить безпечна експлуатація обладнання та персоналу. Одним із ключових етапів технологічного процесу їх виготовлення є ковальська операція згинання, під час якої формується робоча геометрія гака та задаються його експлуатаційні характеристики.

Процес згинання супроводжується нерівномірним розподілом пластичної деформації та інтенсивності напружень, що може призвести до виникнення зон підвищених залишкових напружень, надмірного витягування волокон металу чи навіть зародження дефектів структури. Такі фактори безпосередньо впливають на якість поковки та подальшу працездатність гака в умовах дії змінних навантажень.

Особливу увагу слід приділяти початковому етапу згинання — зоні, розташованій поблизу хвостовика гака, де спостерігається складний напружено-деформований стан, спричинений максимальними деформаціями.

Для деталей великої маси важливим є раціональний вибір температурного режиму, що забезпечує необхідну пластичність металу при мінімальній нерівномірності деформаційного процесу.

У зв'язку з цим актуальним є числовий аналіз процесу згинання однорогих кованих гаків у зоні хвостовика з визначенням впливу температурного режиму на характер розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень з оцінкою нерівномірності формоутворення на початковій стадії згинання.

Літературний огляд. Виробництво кованих гаків великої вантажопідйомності зазвичай складається з послідовності ковальських операцій: підготовка заготовки, осаджування, протягування, кування заготовки і згинання [1]. Саме згинання формує перехідну зону біля хвостовика і робочу гілку гака. У сучасних дослідженнях пластичної деформації згинання розглядають як процес, у якому матеріал у зоні вигину працює по-різному: зовнішні волокна розтягуються, внутрішні — стискаються, а між ними проходить нейтральна лінія, де деформація майже відсутня. Для масивних кованих заготовок, таких як однорогі гаки, на розподіл деформації додатково впливають контакт з оправкою, сили тертя та тепловий обмін із інструментом. Ці фактори можуть зміщувати нейтральну лінію та змінювати форму течії металу. Особливо чутливою є перехідна зона біля хвостовика, де на ранніх етапах формування виникають деформації. Надалі вони можуть перерости у дефекти під час подальших операцій згинання або під дією робочих навантажень [2, 3].

Аналіз наукових джерел свідчить, що більшість досліджень кованих гаків зосереджена на формі поперечного перерізу та оцінці напружено-деформованого стану (НДС) готового виробу. Роботи [4, 5, 7, 9] показують, що форма та параметри перерізу істотно впливають на рівень максимальних напружень, а отже — на надійність гака. Дослідження [6, 8] підтверджують, що конструкційне вдосконалення кривизни та плавності переходів дозволяє істотно знизити максимальні напруження. Значний внесок у вивчення напружено-деформованого стану криволінійної частини гака зроблено в роботах [10, 11], де за допомогою методу скінченних елементів встановлено, що максимальні напруження фокусуються саме у зоні вигину та показали вплив геометрії гака на його міцність. Автори [12] виконали напружено-деформований та втомний аналіз кранових гаків, змінюючи матеріал конструкції. Робота показує, що найбільші максимальні напруження виникають у зоні кривизни, тобто саме там, де під час кування відбувається основне згинання заготовки. У роботі [13] виконано комплексний аналіз причин руйнування кранового гака вантажопідйомністю 24 т. Автори показали, що максимальні напруження у зоні кривизни, пов'язані з формою гака та характером деформацій під

час формування, стали основною причиною виникнення тріщин. Аналогічне дослідження [14] було проведено для причин руйнування С-подібного гака вантажопідйомністю 5 т.

© К.Д.Колісник. 2025

З'ясовано, що С-подібний гак вийшов з ладу через накопичення напружень у зігнутій частині в зоні хвостовика із слідами вібрації та неправильної термічної обробки.

Ці результати підкреслюють важливу роль якості формування кривої частини, яка у кованих однорогих гаків створюється на етапі згинання. Хоча ці роботи орієнтовані переважно на аналіз гаків після виготовлення, їхні висновки прямо стосуються і технологічної стадії згинання. Саме під час початкового формування кривизни, зокрема в зоні хвостовика, закладаються майбутні значення пластичної деформації, які надалі визначають поведінку гака під навантаженням.

Водночас, у літературі практично відсутні дослідження, що системно аналізують вплив температурного режиму згинання на нерівномірність температури та пластичної деформації. Тому моделювання процесу згинання з варіюванням температури, виконане у цій статті, є актуальним та заповнює важливу наукову прогалину, з умовами технологічного формоутворення.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу початкової температури нагріву заготовки на нерівномірність розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень при ковальській операції згинання однорогих гаків великої вантажопідйомності за допомогою чисельного моделювання в програмному середовищі QForm UK [15]. Об'єктом дослідження є процес згинання кованого однорогого гака. Предметом дослідження є закономірності розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень при різних температурних режимах згинання.

Завдання дослідження:

- побудувати 3D-модель процесу згинання однорогого гака у програмному середовищі QForm;
- провести чисельне моделювання при різних температурах нагріву (950–1250 °С);
- проаналізувати розподіл пластичної деформації та інтенсивності напружень, оцінити їх нерівномірність;
- визначити раціональний температурний діапазон, який забезпечує найбільш рівномірний розподіл деформацій без зон перенапруження.

Викладення основного матеріалу та результати. У дослідженні розглянуто початкову стадію згинання однорогого кованого гака, на якій пряма заготовка вигинається навколо однієї осі. Перед згинанням заготовку попередньо нагрівають, що забезпечує необхідну пластичність металу та дає змогу виконувати деформацію без утворення тріщин і поверхневих дефектів. Завдяки нагріву заготовка легше деформується, а напружено-деформований стан металу під час формоутворення покращується.

Розміри заготовки залишилися незмінними для всіх варіантів моделювання, що дозволило оцінити вплив лише температурного фактора. Моделювання виконували для чотирьох температурних режимів нагріву: $t = 950; 1050; 1150; 1250$ °С, що дало змогу проаналізувати нерівномірність розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень, особливо в перехідній зоні біля хвостовика.

На рис. 1 зображено ескіз прямої стрижневої заготовки, з якої формується однорогий кований гак. Заготовка має змінний діаметр уздовж довжини, що відображено набором характерних ділянок: ліва частина — циліндрична ділянка діаметром $\varnothing 105$ мм. Далі заготовка розширюється до $\varnothing 300$ мм довжиною 700 мм, утворюючи плавний перехід. У центральній частині розташовано дві найбільші за перерізом ділянки діаметром $\varnothing 315$ мм, довжиною 600 мм. Після центральної зони заготовка звужується до діаметра $\varnothing 200$ мм на ділянці довжиною 500 мм. Права кінцева частина — відрізок довжиною 1080 мм, що закінчується технологічним торцем (фланцем), який використовується для утримання заготовки під час операції згинання.

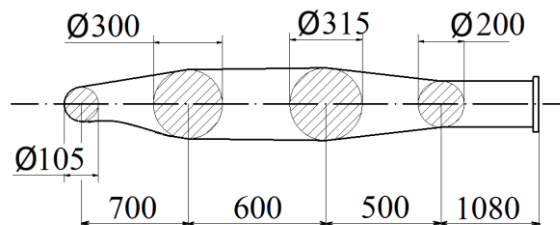


Рис. 1 – Ескіз прямої стрижневої заготовки гака перед операцією згинання

На рис. 2 представлено схему початкового етапу згинання заготовки однорогого гака. Пряма стрижнева заготовка розміщується між опорною плитою та верхнім рухомих пуансоном, виконаним у вигляді ролика. Згинання здійснюється під час опускання пуансона вниз, унаслідок чого заготовка деформується, утворюючи внутрішній радіус згину $R165$ та зовнішній $R485$. У нижній частині схеми показано стійку з двома опорними роликами, між якими розташовується заготовка під час процесу. Відстань між опорними роликами становить 1030 мм, що забезпечує необхідні умови для формування згину. Довжина робочої частини заготовки дорівнює

1700 мм. Відступ від точки прикладання навантаження (центра верхнього ролика) до правого торця заготовки становить 100 мм.

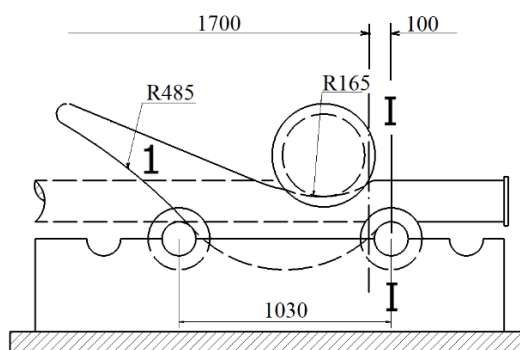


Рис. 2 - Схема першого етапу згинання заготовки

Параметри, які було задано для моделювання процесу згинання:

- матеріал заготовки - steel C22 (аналог сталь 20);
- температура заготовки – $t = 950; 1050; 1150; 1250$ °C;
- температура інструмента – $t = 200$ °C;
- хід інструмента – 190 мм;
- інструмент для згинання – пуансон, стійка з роликami (рис. 3)

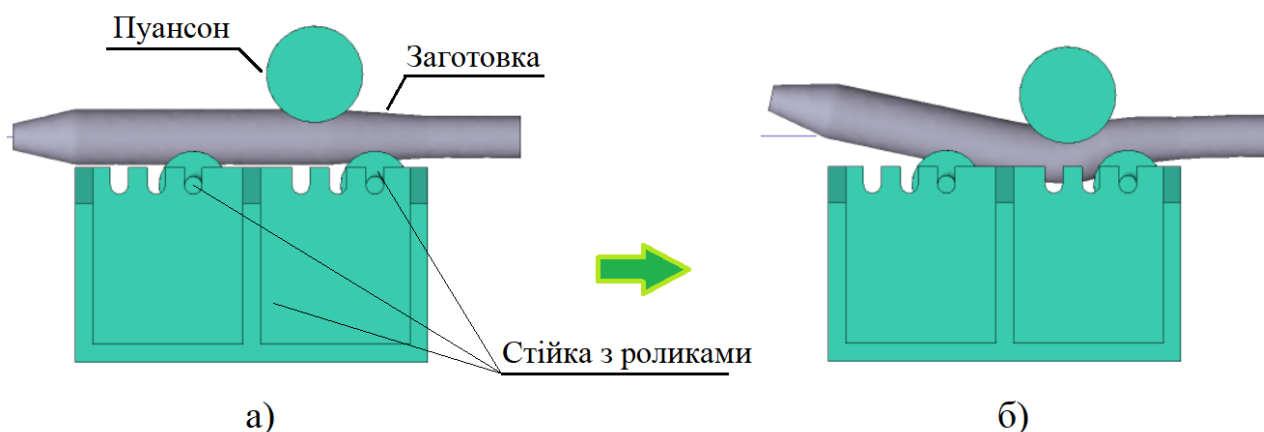


Рис. 3 - 3D-модель процесу згинання заготовки гака початкове положення заготовки перед згинанням (а) та положення заготовки після здійснення першого етапу згинання (б)

Для проведення порівняльного аналізу впливу температурного режиму було змодельовано чотири варіанти технологічного процесу згинання. У кожному варіанті змінювався лише початковий температурний стан заготовки — 950 °C, 1050 °C, 1150 °C та 1250 °C, тоді як усі інші параметри процесу згинання залишалися незмінними.

Аналіз результатів моделювання виконувався в поперечному перерізі А–А, який знаходиться у центральній частині зони найбільших деформацій криволінійної ділянки гака біля хвостовика. На рис. 4 наведено положення цього перерізу відносно деформованої заготовки після завершення початкового етапу згинання.

Для оцінки рівномірності розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень після операції згинання було застосовано метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу, запропонований у роботі [16].

Розраховано показник K_n для оцінки нерівномірності деформації, який характеризує співвідношення еквівалентної деформації в контрольних точках перерізу до її максимального значення в цьому ж перерізі. Оскільки максимальне значення приймається за одиницю, діапазон зміни показника K_n не перевищує 1. Для отримання даних у досліджуваному перерізі було задано чотири лінії, розташовані під кутом 45° одна відносно одної. На кожній лінії симетрично до центра перерізу та точки з максимальною еквівалентною деформацією було виділено сім контрольних точок (див. рис. 4).

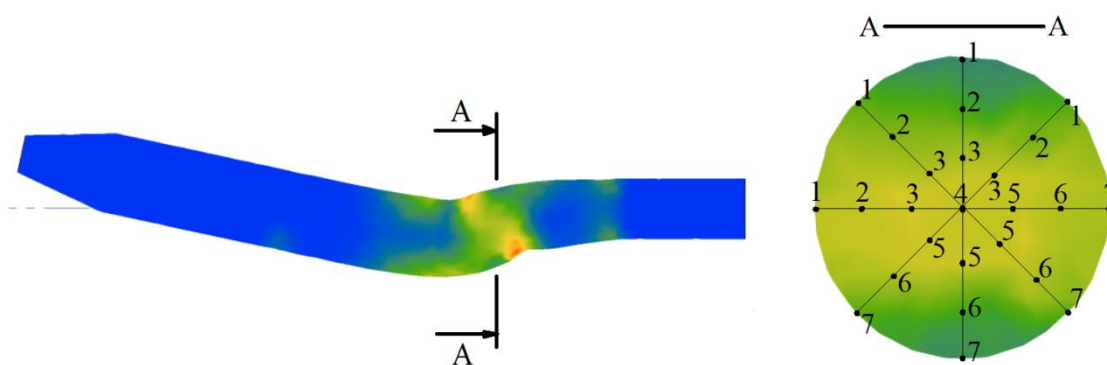


Рис. 4 - Схема розташування ліній та контрольних точок в поперечному перерізі заготовки після завершення початкового етапу згинання

На рис. 5 представлено розподіл пластичної деформації в поперечному перерізі заготовки після операції згинання для чотирьох температурних режимів: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С. На кожному полі кольорова шкала відображає величину пластичної деформації, а маркерами позначено положення точок з максимальними та мінімальними значеннями.

У всіх випадках характер розподілу деформації залишається подібним: максимальні значення знаходяться в центральній зоні перерізу, тоді як мінімальні — у приповерхневій області. Це зумовлено специфікою напружено-деформованого стану при згинанні, коли найбільші деформації зосереджуються в зоні активного зсуву та стиску.

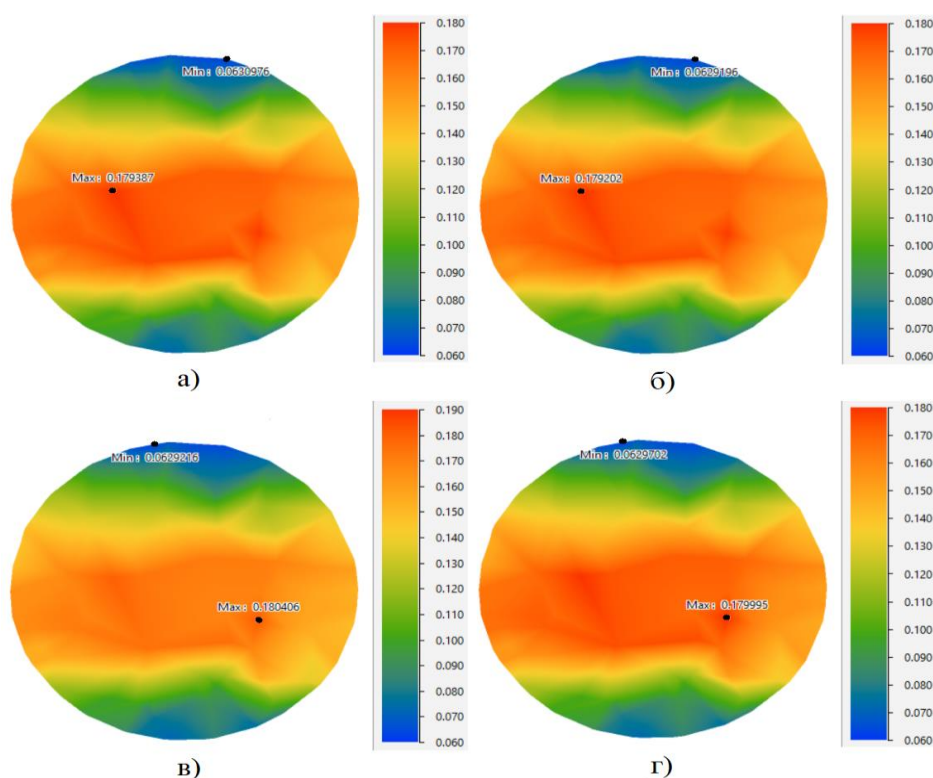


Рис.5 - Розподіл пластичної деформації в поперечному перерізі заготовки на першому етапі згинання при різних температурних режимах $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $t = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); $t = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г)

При температурі 950 °С (рис. 5а) максимальна пластична деформація становить 0,179; а мінімальна — 0,063. Розподіл деформації має помітну різницю між зовнішньою та внутрішньою зонами згину. За температури 1050 °С (рис. 5б) характер розподілу залишається таким самим: максимальна деформація дорівнює 0,179; мінімальна — 0,063. При 1150 °С (рис. 5в) максимальна деформація дещо зростає до 0,18; а мінімальна залишається 0,063. Зі зростанням температури зона максимальних деформацій розширюється та витягується вздовж ширини перерізу заготовки, що вказує на більш рівномірний характер перетікання металу. За

температури 1250 °С (рис. 5г) значення знову становлять 0,179 та 0,063 відповідно. Розподіл стає більш плавним, проте співвідношення між зонами максимальної та мінімальної деформації зберігається.

У цілому, зміна температури практично не впливає на величину пластичної деформації, що свідчить про низьку чутливість цього параметра до температурного режиму на початковому етапі згинання. Водночас положення зон максимальних і мінімальних деформацій зміщується, що є важливим для оцінки нерівномірності деформування. Максимальні значення спостерігаються на зовнішньому радіусі згину (зона розтягнення), мінімальні — на внутрішньому радіусі (зона стискання), що є характерним для процесів згинання. Результати показників пластичної деформації та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати показників пластичної деформації та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах

Температурний режим $t, ^\circ\text{C}$	Мінімальне значення пластичної деформації ε_{\min}	Максимальне значення пластичної деформації ε_{\max}	Коефіцієнт нерівномірності деформації $K_n, \%$
950	0,063	0,179	83
1050	0,063	0,179	72
1150	0,063	0,18	75
1250	0,063	0,179	72

На рис. 6 показано графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності деформації K_n у семи контрольних точках, розташованих уздовж чотирьох вимірювальних ліній поперечного перерізу заготовки, для різних температур згинання: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С.

Для кожного температурного режиму було визначено узагальнене значення коефіцієнта нерівномірності деформації K_n . При температурі $t = 950 ^\circ\text{C}$ (рис. 6а) значення K_n становить 83 %. Для режиму $t = 1050 ^\circ\text{C}$ (рис. 6б) коефіцієнт зменшується до 72 %. За температури $t = 1150 ^\circ\text{C}$ (рис. 6в) K_n становить 75 %, а при $t = 1250 ^\circ\text{C}$ (рис. 6г) знову дорівнює 72 %. Якщо орієнтуватися лише на коефіцієнт нерівномірності деформації K_n , то більш раціональним є той режим, у якому K_n має значення наближене до одиниці, тобто де пластична деформація розподіляється найрівномірніше, у даному випадку найраціональніші режими — 950 °С та 1150 °С, але їхня різниця від режимів 1050 °С та 1250 °С не є суттєвою.

Для всіх температур спостерігається майже однакова закономірність: значення K_n зростає від крайніх до центральних точок перерізу. Найвищі значення припадають на середню зону (точки 3–5), після чого коефіцієнт зменшується. У крайніх точках (1 та 7) нерівномірність найбільша, тоді як у центральній точці 4 значення K_n для всіх чотирьох ліній збігаються. Це свідчить, що в центрі поперечного перерізу деформація є найбільш рівномірною.

Лінії 1 і 2 мають дещо більші значення K_n , ніж лінії 3 і 4, що пов'язано з особливостями напружено-деформованого стану в цих напрямках. Загальний вигляд графіків майже не змінюється при зміні температури, тому вплив температури на нерівномірність деформації на цьому етапі згинання є незначним.

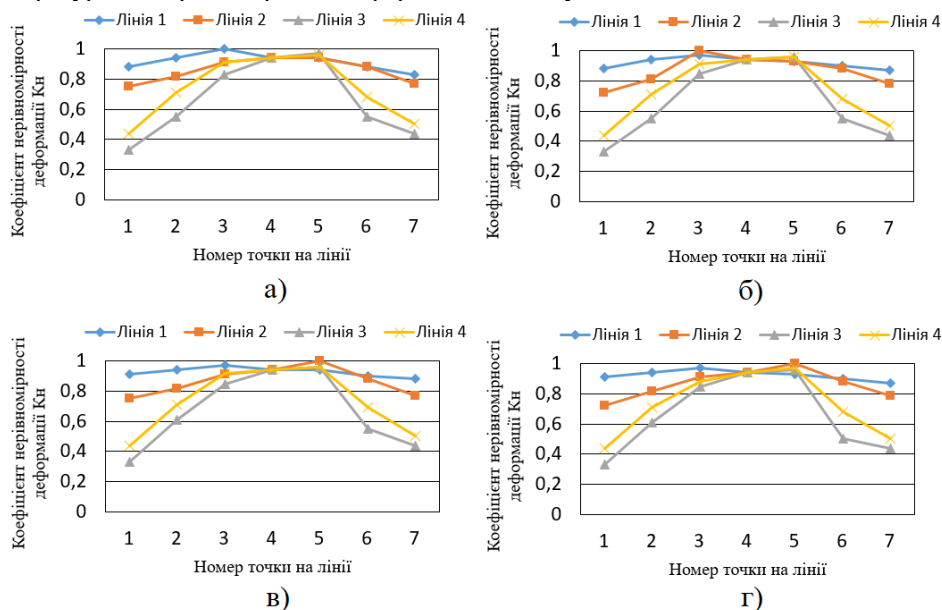


Рис. 6 – Графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності деформації (K_n) у поперечному перерізі заготовки при згинанні з різними температурними режимами $t = 950 ^\circ\text{C}$ (а); $t = 1050 ^\circ\text{C}$ (б); $t = 1150 ^\circ\text{C}$ (в); $t = 1250 ^\circ\text{C}$ (г)

На рис. 7 показано розподіл інтенсивності напружень у поперечному перерізі заготовки після першого етапу згинання для чотирьох температурних режимів: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С.

У всіх випадках спостерігається характерний розподіл, максимальні значення напружень розташовані у зоні розтягнення (нижня частина перерізу — зовнішній радіус згину). Мінімальні значення знаходяться у зоні стиснення (верхня частина перерізу — внутрішній радіус згину).

При температурі 950 °С (рис. 7а) інтенсивність напружень має найбільший діапазон: мінімальне значення становить 51,3 МПа, а максимальне — 78 МПа. При температурі 1050 °С (рис. 7б) загальний рівень напружень знижується 40,6–62 МПа, а розподіл стає більш плавним порівняно з 950 °С. Зона максимальних значень стає компактнішою з температурою 1150 °С (рис. 7в), де напруження продовжують зменшуватися 32,4–49,2 МПа. Температура 1250 °С (рис. 7г) має найнижчий рівень напружень серед усіх режимів 25,3–38,5 МПа.

У міру підвищення температури інтенсивність напружень помітно зменшується, що є типовим для пластичної деформації. При цьому загальна форма розподілу не змінюється: максимальні напруження завжди знаходяться у зоні розтягнення, а мінімальні — у зоні стиснення. Крім того, з ростом температури напружений стан стає більш рівномірним, а градієнти напружень — менш різкими. Результати показників інтенсивності напружень та розрахунку коефіцієнта нерівномірності представлені у Таблиці 2.

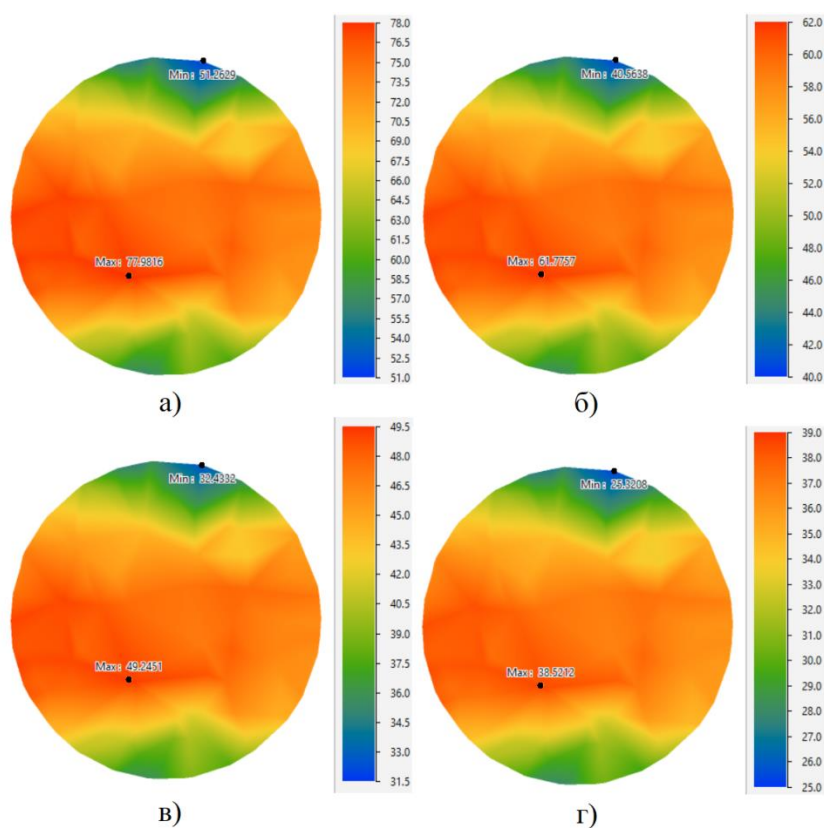


Рис. 8 - Розподіл інтенсивності напружень в поперечному перерізі заготовки на першому етапі згинання при різних температурних режимах $t = 950$ °С (а); $t = 1050$ °С (б); $t = 1150$ °С (в); $t = 1250$ °С (г)

Таблиця 2 – Результати показників інтенсивності напружень та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах

Температурний режим t , °С	Мінімальне значення інтенсивності напружень σ_i min, МПа	Максимальне значення інтенсивності напружень σ_i max, МПа	Коефіцієнт нерівномірності інтенсивності напружень K_n , %
950	51,3	78	75
1050	40,6	62	65
1150	32,4	49,2	65
1250	25,3	38,5	75

На рис. 9 показано залежність коефіцієнта нерівномірності інтенсивності напружень K_n від номера контрольної точки на чотирьох лініях у поперечному перерізі заготовки. Кожен графік (а–г) відповідає окремому температурному режиму згинання.

У всіх варіантах спостерігається подібна форма кривих: K_n зростає від крайніх точок до центральних, досягаючи максимальних значень у ділянці 4–5-ї точок, після чого дещо зменшується на протилежному боці перерізу. Це свідчить про характерний для згинання перерозподіл напружень — максимальні значення формуються в центральній зоні перерізу, а ближче до крайньої зони вони є нижчими.

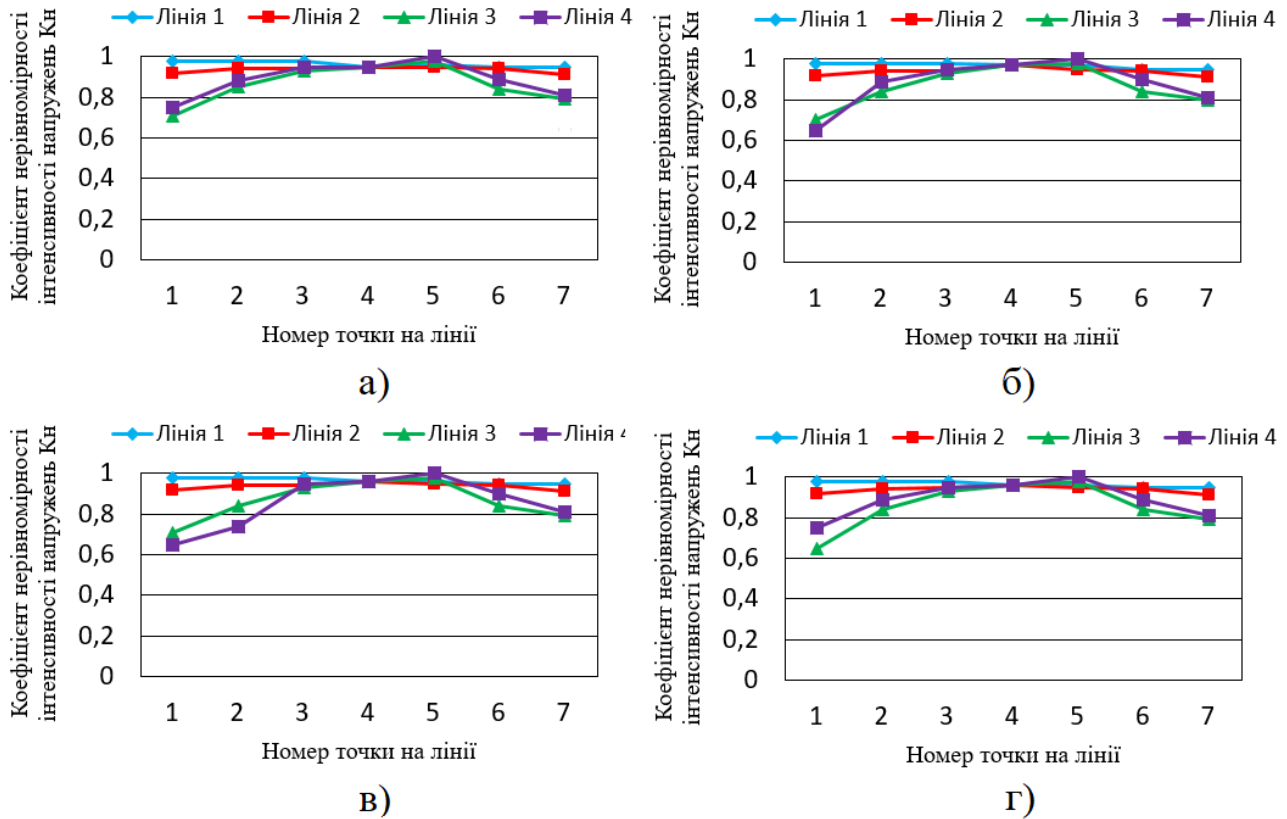


Рис. 9 – Графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності інтенсивності напружень (K_n) у поперечному перерізі заготовки при згинанні з різними температурними режимами $t = 950$ °C (а); $t = 1050$ °C (б); $t = 1150$ °C (в); $t = 1250$ °C (г)

Порівняння температур показує, що: $t = 950$ °C (рис. 9а) – значення K_n на різних лініях досить близькі, а максимальні значення сягають приблизно 0,95–1. Розподіл є відносно рівномірним і має значення K_n 75 %. Температура $t = 1050$ °C (рис. 9б) – значення K_n становить 65 %, але криві вирівнюються ще більше, особливо в центральній частині перерізу, де значення ліній фактично збігаються. При температурі $t = 1150$ °C (рис. 9в) – розподіл залишається стабільним і близьким до рівномірного зі значенням K_n 65 %, хоча спостерігається дещо більша різниця між лініями в крайніх точках. Температура $t = 1250$ °C (рис. 9г) – показники також мають загальну тенденцію до вирівнювання, однак коливання між лініями стають помітнішими в крайніх точках, коефіцієнт нерівномірності K_n має значення 75 %.

Загалом рис. 9 відображає, що всі досліджені температурні режими забезпечують подібний характер розподілу інтенсивності напружень. Найрівномірніший розподіл (найменша різниця від 1 до мінімального значення) спостерігається при температурах 950 °C та 1250 °C, тоді як при 1050 °C та 1150 °C нерівномірність дещо збільшується, переважно у крайніх точках перерізу.

Проведене дослідження показало, що зміна початкової температури нагріву заготовки практично не впливає на величину пластичної деформації, однак впливає на характер її розподілу. Максимальні деформації для всіх досліджених температур зосереджені на зовнішньому радіусі згину, мінімальні — на внутрішньому, що відповідає типовій картині напружено-деформованого стану при згинанні.

Зі зростанням температури зона максимальних деформацій дещо розширюється, а розподіл стає рівномірним. Узагальнені значення коефіцієнта нерівномірності K_n показали, що найменший рівень нерівномірності спостерігається при температурах 950 °C та 1150 °C.

Інтенсивність напружень, на відміну від деформації, суттєво залежить від температури. При підвищенні температури рівень напружень зменшується, що вказує на покращення умов формоутворення. У цілому,

раціональним з погляду рівномірності деформування та мінімізації напружень є температурний діапазон 950–1150 °С.

Висновки.

Температура нагріву заготовки має суттєвий вплив на рівень інтенсивності напружень. Для всіх досліджених інтервалів температур мінімальні та максимальні значення пластичної деформації залишаються практично незмінними (0,063 та 0,179–0,18 відповідно). Це свідчить про низьку чутливість параметра пластичної деформації до температури на початковому етапі згинання.

Характер розподілу деформації залишається однаковим для всіх режимів: максимальні значення фіксуються на зовнішньому радіусі згину (зона розтягнення), мінімальні — на внутрішньому (зона стискання). З підвищенням температури зона максимальних деформацій дещо розширюється, що свідчить про більш рівномірне перетікання металу.

Коефіцієнт нерівномірності деформації K_n демонструє помірну зміну із температурою. Найвищу рівномірність деформації отримано при температурах: 950 °С — 83 %, 1150 °С — 75 %. Режими 1050 °С та 1250 °С показали нижчу рівномірність (72 %), але різниця між режимами є невеликою.

Інтенсивність напружень суттєво зменшується зі збільшенням температури. Діапазон напружень зменшується від 78–51 МПа (950 °С) до 38–25 МПа (1250 °С), що є характерним для пластичної деформації. Вищі температури сприяють більш плавному розподілу напружень та зменшенню різких перепадів.

Характер напружено-деформованого стану залишається типовим для процесів згинання: максимальні напруження виникають у зоні розтягнення, мінімальні — у зоні стискання, незалежно від температури.

Раціональними температурними режимами попереднього нагріву є 950 °С та 1150 °С, оскільки вони забезпечують: вищу рівномірність деформації (максимальний K_n) та помірний рівень напружень.

Загалом дослідження показало, що температура нагріву впливає переважно на рівень інтенсивності напружень і плавність їхнього розподілу, тоді як розподіл пластичної деформації залишається стабільним і мало залежить від температури, що важливо для подальшого конструювання технологічних режимів.

Список літератури:

1. Чухліб В. Л., Колісник К. Д. Аналіз та дослідження технології кування гаків // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні — 2024. — С. 87–93.
2. Riháček J., Barták J., Podaný K. Numerical analysis and optimization of the hook forging process // Manufacturing Modelling, Materials and Metrology. — 2021. — June. — P. 4356–4361.
3. A Review on Design, Selection of Material, Analysis and Failure of Hooks used in Material Handling Equipment / S. K. Mahajan // International Journal of Engineering Research & Technology. — 2023. — Vol. 9, No. 5. — P. 28–37.
4. Dipu N. H., Apu M. H., Chowdhury P. P. Identification of the effective crane hook's cross-section by incorporating finite element method and programming language // Heliyon. — 2024. — P. 1–14.
5. Pavlović G. V., Savković M., Zdravković N., Marković G. Optimization of crane hooks considered as curved beams with different cross-sections – a comparative study using MATLAB // Proceedings of the XXIII International Conference MHCL 2019, FME Belgrade, September 18th - 20th, 2019. — P. 59–64.
6. Dumitriu D., Ionescu M., Rugina C. Hook crane shape design improvement for reducing the maximum stress // Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics. — 2023. — Vol. 68, № 1. — С. 19–39.
7. Shrestha B., Bhandari A., Poudel S., Rao K. V. Crane hook analysis for different cross-section using ANSYS // International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). — 2019. — Vol. 5, No. 12. — P. 67–73.
8. Desai N., Zeytinoglu N. Design and optimization of the geometric properties of a crane hook // World Journal of Engineering and Technology. — 2016. — Vol. 4, No. 3. — С. 391–397. — DOI: 10.4236/wjet.2016.43038.
9. Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективність / Г. Д. Портнов, А. А. Тихий, В. В. Дарієнко, В. В. Пукалов // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : Зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – Вип. 4 (35). – с. 127 – 133.
10. Fetvacı M. C., Gerdemeli I., Erdil A. B. Finite element modelling and static stress analysis of simple hooks // Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” (TMT 2006). Barcelona–Lloret de Mar, Spain, 11–15 September 2006. P. 797–800.
11. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. Perner's Contacts. 2021. Vol. 16, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.46585/pc.2021.2.1702>
12. Zade M. R. Finite element analysis and fatigue analysis of crane hook with different materials // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2017. — Vol. 4, Issue 1. — P. 1429–1436. — e-ISSN 2395-0056; p-ISSN 2395-0072.
13. Kishore K., Sanjay Gujre V., Choudhary S., Sanjay Gujre A., Vishwakarma M., Thirumurgan T., Choudhury M., Adhikary M., Kumar A. Failure analysis of a 24 T crane hook using multi-disciplinary approach // Engineering Failure Analysis. — 2020. — № 104666. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104666>
14. Vara Prasad G., Nair S. Failure investigation of 5T C-hook of EOT crane // AIP Conference Proceedings. — 2024. — Vol. 3231. — Article 020001. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0236758>.
15. QForm UK. (2025). <https://www.qform3d.com/>
16. Чухліб В. Л., Ашкелянець А. В., Губський С. О., Петров О. В., Дуванський О. М., Палієнко В. О., Окунь А. О. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units. 2021. № 1. С. 95–103.

Bibliography (transliterated):

1. Chukhlib V. L., Kolisnyk K. D. Analiz ta doslidzhennia tekhnolohii kuvannia hakiv // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni — 2024. — S. 87–93.
2. Riháček J., Barták J., Podaný K. Numerical analysis and optimization of the hook forging process // Manufacturing Modelling, Materials and Metrology. — 2021. — June. — P. 4356–4361.
3. A Review on Design, Selection of Material, Analysis and Failure of Hooks used in Material Handling Equipment / S. K. Mahajan // International Journal of Engineering Research & Technology. — 2023. — Vol. 9, No. 5. — P. 28–37.
4. Dipu N. H., Apu M. H., Chowdhury P. P. Identification of the effective crane hooks cross-section by incorporating finite element method and programming language // Heliyon. — 2024. — P. 1–14.
5. Pavlović G. V., Savković M., Zdravković N., Marković G. Optimization of crane hooks considered as curved beams with different cross sections – a comparative study using MATLAB // Proceedings of the XXIII International Conference MHCL 2019, FME Belgrade, September 18th - 20th, 2019. — P. 59-64.
6. Dumitriu D., Ionescu M., Rugina C. Hook crane shape design improvement for reducing the maximum stress // Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics. — 2023. — Vol. 68, № 1. — S. 19–39.
7. Shrestha B., Bhandari A., Poudel S., Rao K. V. Crane hook analysis for different cross-section using ANSYS // International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). — 2019. — Vol. 5, No. 12. — P. 67–73.
8. Desai N., Zeytinoglu N. Design and optimization of the geometric properties of a crane hook // World Journal of Engineering and Technology. — 2016. — Vol. 4, No. 3. — S. 391–397. — DOI: 10.4236/wjet.2016.43038.
9. Vplyv formy kovanoho odnorohoho haka na yoho efektyvnist / H. D. Portnov, A. A. Tykhyi, V. V. Dariienko, V. V. Pukalov // Tsentralnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky : Zb. nauk. pr. – Kropyvnytskyi : TsNTU, 2021. – Vyp. 4 (35). – s. 127 – 133.
10. Fetvaci M. C., Gerdemeli I., Erdil A. B. Finite element modelling and static stress analysis of simple hooks // Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” (TMT 2006). Barcelona–Lloret de Mar, Spain, 11–15 September 2006. P. 797–800.
11. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. Parners Contacts. 2021. Vol. 16, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.46585/pc.2021.2.1702>
12. Zade M. R. Finite element analysis and fatigue analysis of crane hook with different materials // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2017. — Vol. 4, Issue 1. — P. 1429–1436. — e-ISSN 2395-0056; p-ISSN 2395-0072.
13. Kishore K., Sanjay Gujre V., Choudhary S., Sanjay Gujre A., Vishwakarma M., Thirumurgan T., Choudhury M., Adhikary M., Kumar A. Failure analysis of a 24 T crane hook using multi-disciplinary approach // Engineering Failure Analysis. — 2020. — № 104666. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104666>
14. Vara Prasad G., Nair S. Failure investigation of 5T C-hook of EOT crane // AIP Conference Proceedings. — 2024. — Vol. 3231. — Article 020001. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0236758>.
15. QForm UK. (2025). <https://www.qform3d.com/>
16. Chukhlib V. L., Ashkelianets A. V., Hubsykyi S. O., Petrov O. V., Duvanskyi O. M., Paliienko V. O., Okun A. O. Rozrobka tekhnolohichnoi kontseptsii proektuvannia protsesiv kuvannia z urakhuvanniam vplyvu rezhymu deformuvannia na yakist pokovok. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units. 2021. № 1. S. 95–103.

Відомості про авторів / About the Authors

Колісник Костянтин Дмитрович (Kolisnyk Kostiantyn) - аспірант кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: kolesnik2195@gmail.com.

АХМЕДОВ А. О., ЧУХЛІБ В. Л., ГУБСЬКИЙ С. О., БІБА М. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ КУВАННЯ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ НА ОПРАВЦІ НА ЯКІСТЬ ПОКОВОК

У роботі розглянуто вплив технологічних параметрів процесу розкочування на оправці на формування якості поковок. Проаналізовано основні фактори, що визначають рівномірність пластичної деформації, напружено-деформований стан та температурний розподіл у заготовці. Використано метод прогнозування нерівномірності та результати комп'ютерного моделювання в програмному комплексі QForm. Встановлено оптимальні режими процесу, що забезпечують однорідність структури та підвищення механічних властивостей виробів. Показано, що оптимізація параметрів дозволяє зменшити кількість дефектів, підвищити точність геометрії та знизити рівень виробничого браку.

Ключові слова: розкочування на оправці, пластична деформація, поковки, QForm, нерівномірність, кут кантування, ступінь деформації.

AKHMEDOV A., CHUKHLIB V., HUBSKYI S., BIBA M.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FORGING REGIME DURING ROLLING ON A MANDREL ON THE QUALITY OF FORGINGS

The paper considers the influence of technological parameters of the rolling process on a mandrel on the quality of forgings. The main factors determining the uniformity of plastic deformation, stress-strain state, and temperature distribution in the blank are analyzed. The method of predicting unevenness and the results of computer modeling in the QForm software package are used. The optimal process modes that ensure the uniformity of the structure and improve the mechanical properties of the products are established. It is shown that optimization of parameters allows reducing the number of defects, improving the accuracy of geometry, and reducing the level of production waste.

Keywords: mandrel rolling, plastic deformation, forgings, QForm, unevenness, rolling angle, degree of deformation.

Вступ. Розкочування на оправці широко застосовується у виробництві великогабаритних поковок, що використовуються в енергетичному, машинобудівному та нафтогазовому секторах. Процес дозволяє формувати точну внутрішню геометрію виробів і забезпечує рівномірний розвиток деформації за рахунок наявності жорсткої оправки. Якість отриманої поковки значною мірою визначається температурними режимами, швидкістю деформації, геометрією інструменту та схемою навантаження, а їх порушення може спричинити нерівномірність товщини стінки, залишкові напруження, перегріву або тріщини.

У сучасних умовах підвищеної відповідальності виробів виникає необхідність оптимізації параметрів процесу, що забезпечують стабільність формоутворення та мінімізацію дефектності. Чисельне моделювання стало невід'ємною частиною такого аналізу, дозволяючи оцінити напружено-деформований стан заготовки, прогнозувати поведінку металу під навантаженням і визначати раціональні технологічні режими без надмірних виробничих експериментів. Саме тому актуальною є розробка та дослідження оптимальних режимів розкочування на основі аналітичних методів і комп'ютерного моделювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес розкочування на оправці є однією з найважливіших та найбільш ефективних технологічних операцій гарячої обробки тиском, що застосовується для виготовлення порожнистих, ступінчастих та конічних поковок високої точності. На відміну від традиційних методів кування, взаємодія в системі «бойок - заготовка - оправка» дозволяє одночасно контролювати формування зовнішнього та внутрішнього профілю виробу (рис.1), забезпечуючи однорідне протікання металу та високу точність розмірів [1-8]. Заготовка встановлюється на жорстку оправку, де під дією обтиснень бойка, що чергуються з обертанням, метал витісняється вздовж поверхні оправки, формуючи рівномірну товщину стінки та точну внутрішню геометрію [1-2].

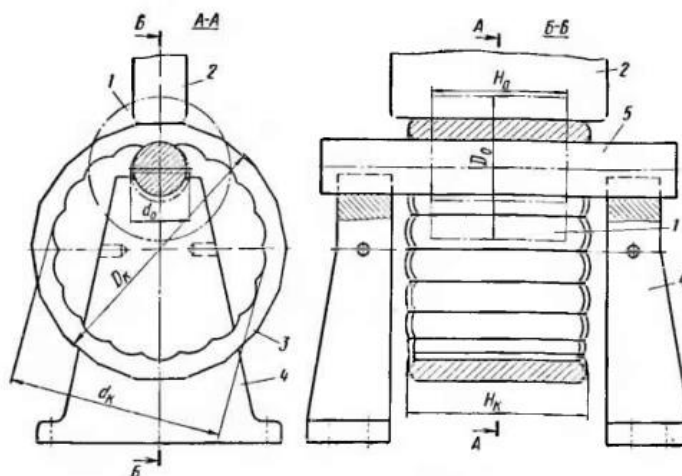


Рис. 1 - Схема процесу розкочування: 1 - прошита заготовка, 2 – вузький плоский бойок, 3 – кільце при розкочуванні, 4 – стійки, 5 – оправка

Технологічний цикл процесу складається з кількох послідовних етапів: осаджування та прошивання вихідного злитка, формування отвору, натягування заготовки на оправку, здійснення попереднього обтиснення, виконання основного розкочування та фінального калібрування профілю. У роботі [23] зазначено, що етап попереднього формування (рис. 2) відіграє ключову роль у забезпеченні рівномірності початкової товщини стінки, усуненні литих дефектів та досягненні правильного позиціонування металу відносно оправки.

Одним із визначальних факторів технології є геометрія вихідної заготовки. Зміна товщини, різкі переходи та наявність уступів суттєво впливають на характер течії металу під час деформації. Згідно з даними літературних джерел [14–19], у зонах переходу між різними товщинами виникають максимальні локальні деформації та напруження. Саме ці зони є найбільш схильними до виникнення дефектів, таких як конусність, порожнини, внутрішні розриви або викривлення осі. Оптимальний профіль бойка та коректно вибрана траєкторія інструмента дозволяють спрямовувати метал у необхідному напрямку та уникати небезпечних локальних перевантажень.

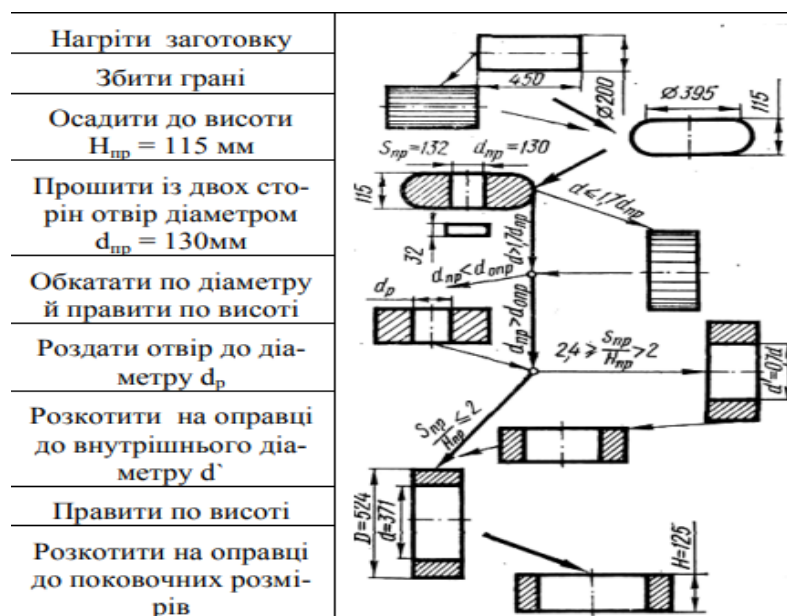


Рис. 2 - Логічна схема переходів кування

Важливим напрямом досліджень стала проблема локальних дефектів, пов'язаних з геометрією заготовки та інструменту. Зокрема, у роботах [10–13] зазначається, що занадто малий кут нахилу уступу (менше 10°) призводить до концентрованих деформацій, утворення порожнин, «заломів» та зриву течії металу в перехідних зонах, що також створює надмірне навантаження на оправку [8–12]. Значну увагу приділяють чисельному моделюванню процесу. Програмні комплекси, такі як DEFORM-3D та QForm, використовуються для аналізу пластичної деформації, напружено-деформованого стану та температурних полів, що дозволяє визначити зони потенційних дефектів і вибрати оптимальні режими розкочування [20].

Мета дослідження. Визначити раціональні технологічні режими розкочування на оправці, що забезпечують високу якість поковок, шляхом аналізу впливу кута кантування, ступеня деформації, температури деформації та параметрів інструменту на рівномірність напружено-деформованого стану та формування структури металу.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження впливу параметрів розкочування у роботі було проведено моделювання в програмному комплексі QForm [20]. Попередньо геометрію заготовки, бойка та оправки було змодельовано у Fusion 360, після чого дані експортовано до QForm.

Початкові параметри симуляції відповідали реальним умовам: матеріал - сталь 10, температура початку деформації - 1200°C , діаметр оправки - 95 % від внутрішнього діаметра заготовки, інструмент - сталь 38ХМ.

Було досліджено два варіанти кута кантування (15° і 30°) та два можливих ступені деформації (10 % і 20 %). Моделювання показало, що при куті кантування 15° виникає значне локальне підвищення деформацій у перехідних зонах, що відповідає нерівномірності з коефіцієнтом $N > 1.25$. При куті 30° значення нерівномірності знижувалися до $N \approx 1.05-1.10$, що свідчить про майже рівномірний розподіл пластичної деформації.

Подібні залежності виявлено й у температурному полі. При 10 % деформації зберігаються холодні зони, які не встигають набрати необхідний рівень деформації. При збільшенні ступеня до 20 % температура розподіляється рівномірно, що створює сприятливі умови для однорідної течії металу.

У роботі виконано всебічний аналіз впливу кута кантування та ступеня деформації на рівномірність напружено-деформованого стану поковок. Показано, (рис.3) що при куті кантування 15° формуються виражені зони нерівномірних деформацій: периферійні області зазнають значно більших обтиснень, тоді як центральні ділянки залишаються недостатньо деформованими [14–16]. Наслідком такого процесу можуть бути мікротріщини, зони недостатнього ущільнення або нерівномірність товщини стінки.

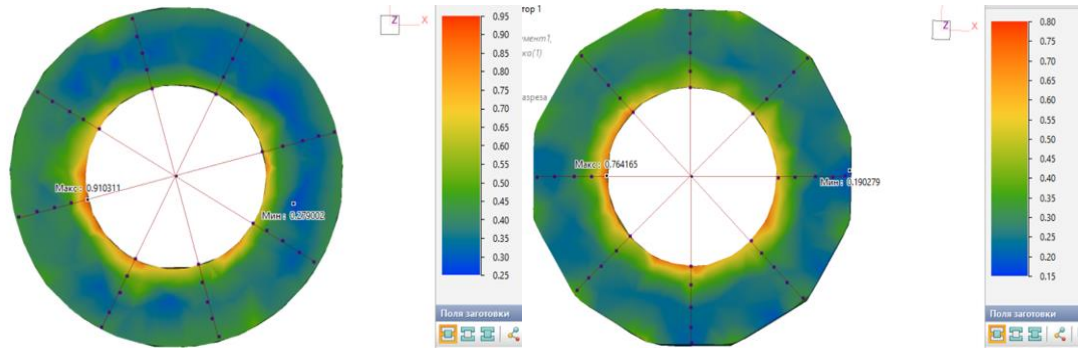


Рис.3 - Заготовки при куті кантування 15° та 30°

При збільшенні кута до 30° (рис.3) характер деформації суттєво покращується: пластична течія охоплює увесь об'єм металу, зменшується градієнт напружень і фактично зникають зони недеформованого матеріалу.

Аналогічна залежність виявлена й щодо сумарного ступеня деформації (рис. 4). При 10 % деформації процес відбувається переважно у поверхневих шарах, що може спричинити залишкові дефекти структури та неоднорідність механічних властивостей. Зі збільшенням ступеня до 20 % деформація рівномірно проникає в центральні шари заготовки, забезпечуючи повноцінне руйнування литої структури та формування рівномірної, щільної металеві основи.

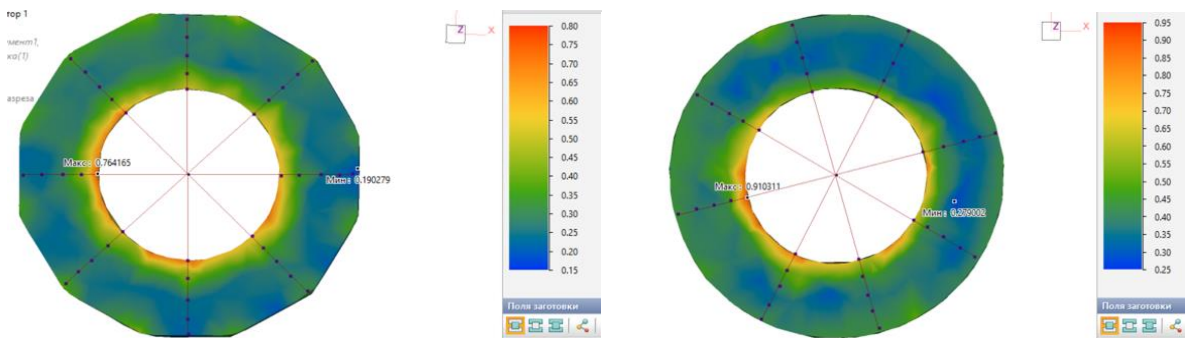


Рис.4 - Заготовки з сумарними ступенями деформації 20% та 10%

Графік інтенсивності напружень (рис.5), підтверджує, що максимальні пікові навантаження припадають на перехідні ділянки, а оптимальний режим (30° , 20 %) мінімізує цю різницю між піковими та середніми значеннями.

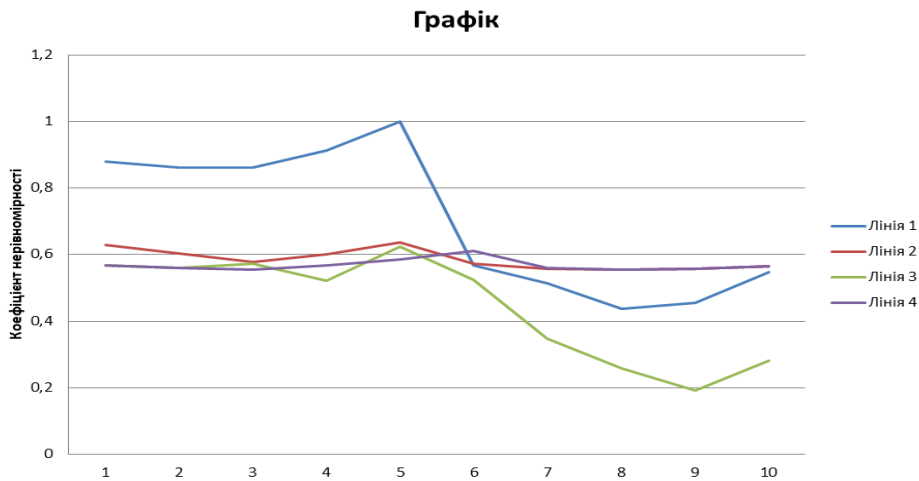


Рис.5 - Графік інтенсивності напружень

Метод прогнозування нерівномірності, застосований у роботі [21], показав свою ефективність: для аналізу схеми з кутом 15° і коефіцієнт нерівномірності місцями становив лише 0.55–0.65, що свідчить про критичні концентрації напружень, тоді як при 30° його значення піднімалися до 0.85–0.95, демонструючи більш стабільний та рівномірний процес деформування.

Висновки. В роботі зроблений узагальнюючий огляд підходів до дослідження та оптимізації процесу розкочування на оправці, що дозволило оцінити вплив основних технологічних параметрів на формування порожнистих поковок. На основі аналізу літературних даних та результатів моделювання встановлено, що на рівномірність напружено-деформованого стану найбільше впливають кут кантування, ступінь деформації, геометрія заготовки та конфігурація інструменту. Показано, що при малих кутах кантування та недостатньому обтисненні виникає нерівномірність деформацій і локальні зони концентрації напружень, що підвищує ймовірність утворення дефектів. Моделювання в QForm підтвердило наявність суттєвих градієнтів деформацій у перехідних зонах за нерациональних режимів. Рациональним є поєднання кута кантування 30° та сумарного ступеня деформації 20 %, яке забезпечує рівномірну пластичну течію металу, зменшення пікових навантажень і стабільне формоутворення, що сприяє отриманню поковок з однорідною структурою та точною геометрією. Отримані результати підтверджують доцільність застосування чисельного моделювання для вибору рациональних режимів розкочування та можуть бути використані для підвищення якості й надійності порожнистих поковок у виробничій практиці.

Список літератури

1. Протягування: формозмінення при протягування; основні правила протягування; способи протягування. *Всеосвіта юа*. URL:<https://vseosvita.ua/lesson/lektsiia-8-tema-21-protiazhka-formozminennia-pry-protiazhtsi-osnovni-pravyla-protiazhky-sposoby-protiazhky-58088.html>
2. ISO 7805-2:2017 "Rolling of metals. Part 2: Mandrel rolling process"
3. The Japan Steel works, LTD. URL:<https://www.jsw.co.jp/en/>
4. Japan Steel Works M&E, Inc. URL:<https://www.jsw-me.com/en/products/01-02-01.html>
5. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // Марков О.Є. Панов, В.В. Іванова Ю.О., Хващинський А.С, Мусорін А.В., Косілов М.С. / Вісник Приазовського державного технічного університету, 2021р. Серія: Технічні науки Вип. 42, с 92-99.
6. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 1985. – Vol. 84, iss. 2. – Pp. 261-272.
7. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Zelezný, L. Sochor, P. Fila // Materials and technology. – 2008. – Vol. 42, iss. 4. – Pp. 183-188.
8. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // Materials Research Innovations. – 2011. – Vol. 15, iss. sup 1. – Pp. s458-s462.
9. Експериментальне дослідження процесу розкочування конусних обичайок зі складним профілем // О. С. Марков, М. С. Косілов, Ю. О. Іванова, В. В. Коткова / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2021 (127). С 100 – 105
10. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S./ Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2018.- Vol. 95.- No. 5.- P. 16-24.
11. Rutskiĭ D. V., Zyuban N. A., Chubukov M. Y./ Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings.// Part 1 Metallurgist.- 2016, 1.- pp. 156–163.
12. Zhbankov I. G., Markov O. E., Perig A. V./ Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2014.- P. 865–872.
13. Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N./ Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2016.- Vol. 4, -No. 83.- P. 2159–2174.
14. Аналіз формозміни та деформованого стану пустотлої ступінчастої поковки в процесі розкочування // О.Є. Марков М.С. Косілов О.В. Герасименко, С.О. Шевцов / Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна. – 2017- Mechanics and Advanced Technologies. С 47-53.
15. Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process / I. G. Zhbankov, O. E. Markov, A. V. Perig // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(5–8), 865 – 872.
16. State of the art in the manufacture of heavy forgings for reactor components in the Federal Republic of Germany / M. Erve, F. Papouschek, K. Fischer, C. Maidorn. // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – №3. – P. 485–495.
17. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом // М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. С. Марков / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2018 (109). Частина 1,серія: сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві, с 41-47
18. Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком // М. С. Косілов, О. С. Марков, О. В. Герасименко, С. В. Інчаков / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 5/2017 (106), серія: сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві, с 75-81.
19. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми // Марков О.Є., Косілов М.С., Станков В.Ю., Різак П.І. / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ. № 40, 2017. С. 114-120.
20. QForm 3D. URL:<https://qform3d.com/>
21. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок / В. Л. Чухліб [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1. – Стор. 95-103.
22. Сучасні технологічні процеси виготовлення заготовок крупних деталей відповідального призначення: посібник для студентів галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання / О.С. Марков, В.В. Коткова, Н.Г. Шевченко – Краматорськ : ДДМА, 2019. – 103 стор.

23. Технологічні процеси за фахом. Кування і штампування : навчальний посібник / В. В. Кухар, Б. С. Каргін, О. С. Аніщенко, С. Б. Каргін, А. Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2017. – 144 стор.

References (transliterated)

1. Broaching: shape change during broaching; basic rules of broaching; broaching methods. Vseosvita ua. URL:<https://vseosvita.ua/lesson/leksiia-8-tema-21-protiazhka-formozminennia-pry-protiazhti-osnovni-pravyly-protiazhky-sposoby-protiazhky-58088.html>
2. - ISO 7805-2:2017 "Rolling of metals. Part 2: Mandrel rolling process
3. The Japan Steel Works, LTD. URL:<https://www.jsw.co.jp/en/>
4. Japan Steel Works M&E, Inc. URL:<https://www.jsw-me.com/en/products/01-02-01.html>
5. Experimental study of the rolling process of stepped conical rings // Markov O.E. Panov, V.V., Ivanova Yu.O., Khvashchinsky A.S., Musorin A.V., Kosilov M.S. / Bulletin of the Priazovskiy State Technical University, 2021. Series: Technical Sciences Issue 42, pp. 92-99.
6. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 1985. – Vol. 84, iss. 2. – Pp. 261-272.
7. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Zelezný, L. Sochor, P. Fila // Materials and technology. – 2008. – Vol. 42, iss. 4. – Pp. 183-188.
8. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // Materials Research Innovations. – 2011. – Vol. 15, iss. sup 1. – Pp. s458-s462.
9. Experimental study of the process of rolling conical shells with a complex profile // O. E. Markov, M. S. Kosilov, Yu. O. Ivanova, V. V. Kotkova / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 2/2021 (127). Pp. 100–105
10. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S./ Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2018.- Vol. 95.- No. 5.- P. 16-24.
11. Rutskii D. V., Zyuban N. A., Chubukov M. Y./ Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings.// Part 1 Metallurgist.- 2016, 1.- pp. 156–163.
12. Zhbakov I. G., Markov O. E., Perig A. V./ Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2014.- P. 865–872.
13. Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N./ Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2016.- Vol. 4, -No. 83.- P. 2159–2174.
14. Analysis of shape change and deformed state of hollow stepped forgings during rolling // O.E. Markov, M.S. Kosilov, O.V. Gerasimenko, S.O. Shevtsov / Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine. – 2017- Mechanics and Advanced Technologies. C 47-53.
15. Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process / I. G. Zhbakov, O. E. Markov, A. V. Perig // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(5–8), 865 – 872.
16. State of the art in the manufacture of heavy forgings for reactor components in the Federal Republic of Germany / M. Erve, F. Papouschek, K. Fischer, C. Maidorn. // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – №3. – P. 485–495.
17. Defect formation on flanges with a one-sided shoulder during rolling with a profiled step tool // M. S. Kosilov, O. V. Gerasymenko, O. E. Markov / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 2/2018 (109). Part 1, series: modern technologies in mechanical engineering, transport, and mining, pp. 41–47
18. Study of the shape change and deformed state of stepped blanks during rolling with a profiled punch // M. S. Kosilov, O. E. Markov, O. V. Gerasymenko, E. V. Inchakov / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 5/2017 (106), series: modern technologies in mechanical engineering, transport and mining, pp. 75-81.
19. Study of shape change in forgings during rolling with a step-shaped tool // Markov O.E., Kosilov M.S., Stankov V.Yu., Rizak P.I. / Tool reliability and optimization of technological systems. Collection of scientific works. Kramatorsk. No. 40, 2017. Pp. 114-120.
20. QForm 3D. URL:<https://qform3d.com/>
21. Development of a technological concept for the design of forging processes taking into account the influence of the deformation regime on the quality of forgings / V. L. Chukhlib [et al.] // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units : collection of scientific works. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – No. 1. – P. 95-103.
22. Modern technological processes for manufacturing large-scale critical components: a manual for students in the field of knowledge 13 "Mechanical Engineering" in full-time and part-time forms of study / O.E. Markov, V.V. Kotkova, N.G. Shevchenko — Kramatorsk: DDMA, 2019. — 103 p.
23. Technological processes by specialty. Forging and stamping: textbook / V. V. Kukhar, B. S. Kargin, O. S. Anishchenko, S. B. Kargin, A. G. Prisyazhny. – Mariupol: PDTU, 2017. – 144 p.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Ахмедов Артем Олександрович (Akhmedov Artem) – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; e-mail: ahmedov02@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6166-9835.

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: profdnepro@gmail.com

Губський Сергій Олександрович (Hubskiy Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Біба Микола Вікторович (Biba Mykola) – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: nick@qform.com

ДОЛЯ В. С., ЧУХЛІВ В. Л., БОБРОВ О. Г., ТАРАН О. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СХЕМ КОВАЛЬСЬКОГО ПРОТЯГУВАННЯ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВІЛЬНОМУ КУВАННІ

Анотація. У роботі виконано дослідження впливу різних схем ковальського протягування — «проходами» та «по гвинту» — на нерівномірність показників процесу вільного кування. Моделювання виконано у програмному комплексі QForm. Проаналізовано закономірності впливу деформованого стану поковки на рівномірність пластичної течії. Отримані результати показали, що використання гвинтової схеми протягування сприяє зменшенню нерівномірності деформацій і підвищенню якості поковок за рахунок більш рівномірного перерозподілу металу.

Ключові слова: кування, протягування, «по гвинту», QForm, деформація.

DOLIA V., CHUKHLIV V., BOBROV O., TARAN O.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF FORGING DRAWING SCHEMES ON THE UNUNIFORMITY OF DEFORMATION IN FREE FORGING

Abstract. The paper investigates the influence of different forging drawing schemes — ‘passes’ and ‘screw’ — on the unevenness of free forging process indicators. The modelling was performed in the QForm software package. The patterns of influence of the deformed state of the forging on the uniformity of plastic flow were analysed. The results showed that the use of the screw drawing scheme contributes to a reduction in the unevenness of deformations and an improvement in the quality of forgings due to a more uniform redistribution of metal.

Keywords: forging, drawing, screw scheme, QForm, deformation.

Вступ. Вільне кування є одним із найпоширеніших методів обробки металів тиском, який широко застосовується для виготовлення великогабаритних заготовок, що використовуються в енергетичному, машинобудівному та транспортному обладнанні. Цей процес забезпечує отримання поковок високої якості з підвищеними механічними властивостями. Разом із тим, процес вільного кування супроводжується нерівномірністю пластичної течії металу, що призводить до концентрації напружень, неоднорідності структури та утворення дефектів у центральній частині заготовки, що знижує якість та надійність металопродукції, особливо при виготовленні великих поковок.

У зв'язку з цим актуальним завданням є дослідження впливу кінематичних схем ковальського протягування на рівномірність розподілу деформованого стану заготовки, а також оцінювання ефективності різних підходів до поліпшення умов течії металу під час вільного кування.

Аналіз літератури. Вільне кування є одним із найпоширеніших методів обробки металів тиском, який застосовується при виготовленні великогабаритних поковок для енергетичного, машинобудівного та транспортного обладнання [2, 3]. Процес полягає у деформуванні металу між бойками без обмеження його бічного плину. Кування використовують не лише як технологію формоутворення, а й як ефективний засіб покращення структури та властивостей металу [2, 6]. У процесі кування поковка проходить інтенсивну пластичну деформацію, завдяки чому відбувається зварювання внутрішніх дефектів, подрібнення зерна, утворення дрібнозернистої та волокнистої структури, що позитивно впливає на її якість [6].

Порушення режимів нагрівання заготовок можуть спричинити появу характерних дефектів поковок: внутрішніх тріщин, глибоких вм'ятин, грубозернистої структури, а також нерівномірного залому [2, 13]. Під час здійснення операцій пластичної деформації (кування чи штампування) можуть виникати дефекти різного походження, зокрема, зовнішні та внутрішні тріщини, задири, вм'ятини, затискання, рвані поверхні, розшарування, відхилення від заданої геометрії виробу [13, 14].

Основними операціями є осаджування, протягування, формування, рубання та правлення. Від рівномірності деформації залежить структура, щільність і механічні властивості матеріалу [2, 3]. Під час вільного кування часто виникає нерівномірність пластичної течії металу, що призводить до внутрішніх напружень, неоднорідності структури та появи дефектів у центральній частині поковки [4, 5, 17]. Тому актуальним завданням є підвищення рівномірності деформації шляхом вибору оптимальних схем кування та кінематичних параметрів [9, 10, 15, 21].

Одним із ефективних способів є застосування схеми “по гвинту”. Схема “проходами” передбачає поступальний рух заготовки без обертання, у той час як “по гвинту” поєднання поступального переміщення та обертання навколо осі на певний кут. Це створює спіральний потік металу, що сприяє кращому його перетіканню від центра до периферії [8, 11, 15]. Дослідження останніх років показують, що саме схема “по гвинту” ковальського протягування здатні суттєво зменшити нерівномірність інтенсивності деформацій у поперечному перерізі поковок і знизити концентрацію залишкових напружень [12, 16, 18, 19]. Такі кінематичні умови сприяють подрібненню зерна, підвищенню однорідності структури та зменшенню схильності до утворення внутрішніх тріщин [5, 6, 18].

Моделювання процесів вільного кування в програмному середовищі QForm дозволяє точно оцінювати розподіл полів деформації, напружень і температури, а також прогнозувати утворення дефектів [7, 9, 15, 20]. Числові експерименти, виконані з урахуванням теплового контакту між заготовкою та інструментом, показали, що при застосуванні схеми “по гвинту” нерівномірність деформації зменшується приблизно на 25–35 % порівняно зі схемою “проходами” [10, 21].

У роботах [12, 16, 18, 19] наголошується, що перехід до схеми “по гвинту” або комбінованого протягування дає змогу забезпечити кращу течію металу, скоротити центральну зону недеформованого матеріалу та покращити якість металопродукції. Подібні результати підтверджують і дослідження, виконані на основі експериментальних випробувань поковок з легованих сталей [13, 16, 18].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що впровадження схеми “по гвинту” у процес вільного кування є перспективним напрямом підвищення рівномірності пластичного деформування та якості готових виробів, а числове моделювання у QForm виступає ефективним інструментом для теоретичного прогнозування та оптимізації цих процесів.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення впливу схем “проходами” та “по гвинту” для ковального протягування на нерівномірність деформацій у процесі вільного кування шляхом числового моделювання в середовищі *QForm*.

У даній роботі проведено числове моделювання процесів вільного кування для заготовки зі сталі 45 діаметром 600 мм і довжиною 2000 мм. Початкова температура заготовки становила 1200 °С. Дослідження виконувалися при подачі 200 мм (половина ширини бойка) і відносній деформації 10 %. Для моделювання використовували гідравлічний прес номінальною силою 16 МН та плоскі бойки зі сталі 5ХНМ.

Результати дослідження. Схема “проходами” (рис.1) передбачає поступальне переміщення заготовки між плоскими бойками без обертання навколо осі. Після кожного проходу заготовка повертається на кут 90–120° для забезпечення рівномірності деформації по перерізу. Такий метод широко використовується для протягування валів, осей та заготовок з круглим або квадратним поперечним перерізом [1]. 3D-модель заготовки при цій схемі демонструє характерну зміну геометрії — зменшення діаметра по всій довжині та локальне розширення зони контакту з бойками. У периферійних областях спостерігається підвищена інтенсивність деформації, тоді як центральна частина залишається менш деформованою.

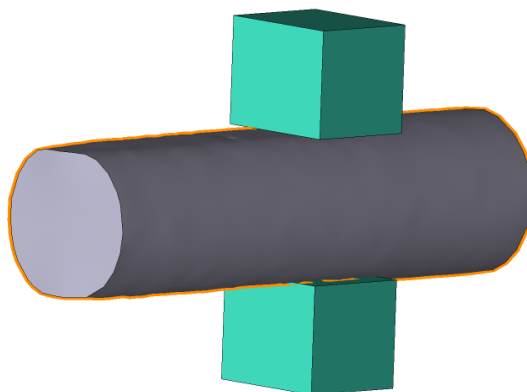


Рис 1. – 3D модель протягування «проходами»

Схема “по гвинту” (рис. 2) характеризується поєднанням поступального переміщення заготовки вздовж осі та її обертання на певний кут після кожного удару. У результаті формується спіральна траєкторія течії металу, що сприяє більш рівномірному перерозподілу деформацій у поперечному перерізі [22]. На 3D-моделі видно плавну зміну об’єму та розтягування матеріалу вздовж осі, що ілюструє рівномірну пластичну течію металу по спіральній траєкторії.

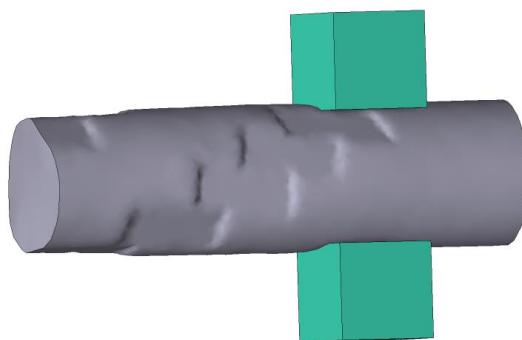


Рис. 2 – 3D модель протягування “по гвинту”

Моделювання проведено в програмному комплексі QForm з урахуванням теплового контакту між заготовкою та інструментом. Визначали максимальні (ϵ_{max}) та мінімальні (ϵ_{min}) значення інтенсивності деформації для оцінки коефіцієнта нерівномірності:

$$K_n = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{max}},$$

Д

є ϵ_i величина деформації в контрольній точці; ϵ_{max} – максимальна величина деформації в перерізі.

Для оцінювання об’ємної нерівномірності деформації металу під час кування, а також прогнозування розподілу механічних властивостей, було запропоновано спеціальний метод[23]. Суть методу полягає у визначенні в кожному досліджуваному поперечному перерізі точки з найвищим рівнем деформації. Від цієї точки через центр перерізу проводять одну з чотирьох ліній, які розміщені під взаємним кутом 45°. На кожній з цих ліній розміщують по шість контрольних точок, симетрично відносно як точки з максимальною деформацією, так і центру перерізу, відповідно до представленної схеми (рис. 5).

Спочатку були створені 3D-моделі заготовок відповідно до схем протягування “проходами” та “по гвинту”. Після цього побудовані моделі було імпортовано в програмне середовище QForm, де проведено налаштування всіх необхідних параметрів для моделювання процесів вільного кування. У результаті здійснено числове дослідження напружено-деформованого стану заготовки при протягуванні “проходами” (рис. 3) та при протягуванні “по гвинту” (рис. 4).

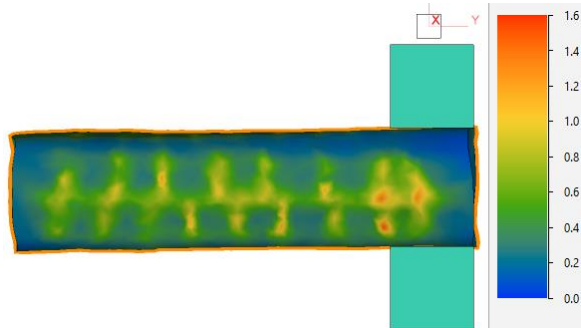


Рис. 3 - Формозміна заготовки при схемі протягування “проходами”

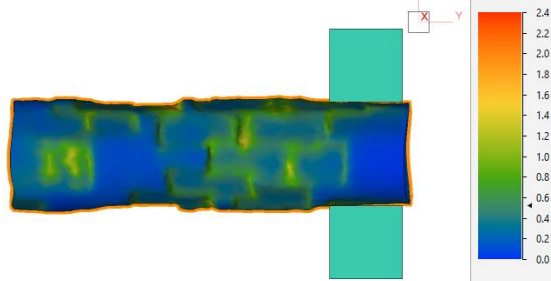


Рис. 4 - Формозміна заготовки при схемі протягування “по гвинту”.

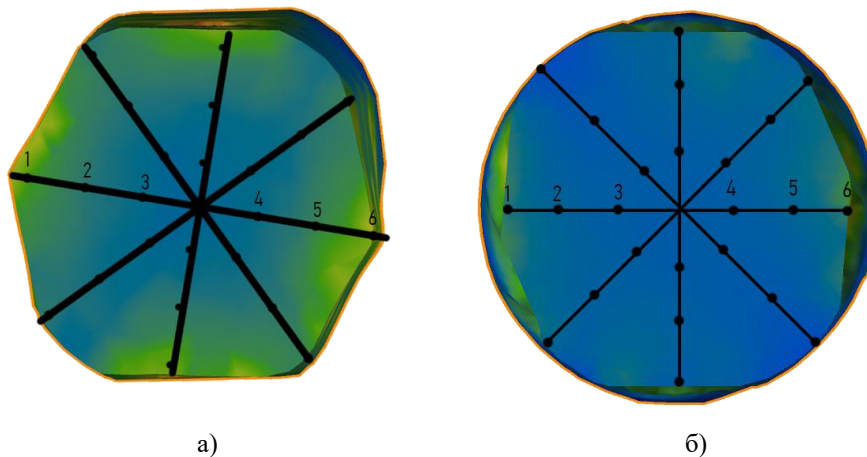
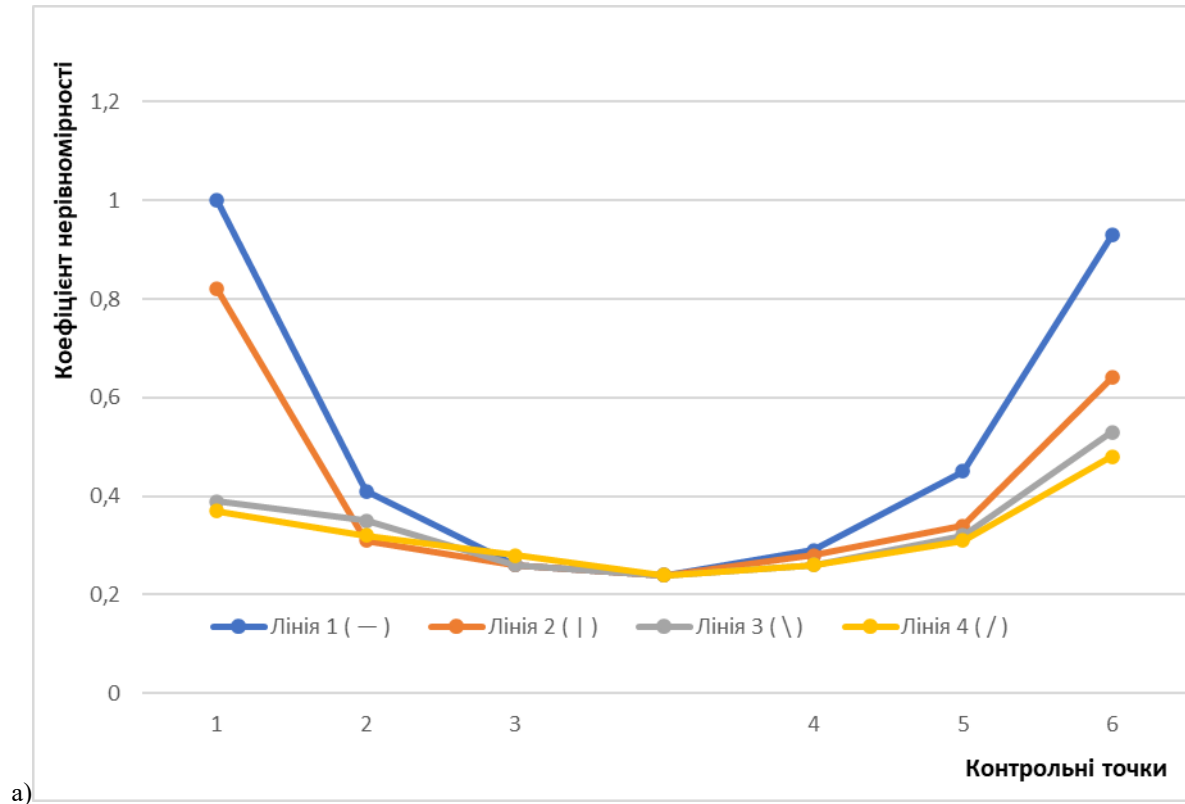


Рис. 5 - Розташування ліній та контрольних точок у перерізі при протягуванні заготовок за схемою “проходами” (а), та “по гвинту” (б).

Моделювання процесів виконано із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу QForm, призначеного для числового аналізу та оптимізації технологій обробки металів тиском. QForm дає змогу відтворювати кінематичні, теплові та напружено-деформовані параметри процесу, що забезпечує високу точність результатів і надійність отриманих даних.

Здійснено числовий аналіз нерівномірності деформації металу при моделюванні вільного кування за схемами протягування “проходами” та “по гвинту”. Для обох схем розраховано показники нерівномірності деформацій у поперечному перерізі заготовки та побудовано графічні залежності розподілу деформацій (рис. 5).

З аналізу рис. 5а видно, що при схемі протягування “проходами” нерівномірність деформації змінюється від 0,24 до 1. Для схеми “по гвинту” (рис. 5б) цей показник коливається в межах від 0,46 до 1. Отримані результати свідчать, що використання схеми “по гвинту” зменшує нерівномірність деформації приблизно на 30 % порівняно з «проходами». Це забезпечує більш рівномірний розподіл напружень у металі, покращує пластичну течію та сприяє підвищенню якості кованих виробів.



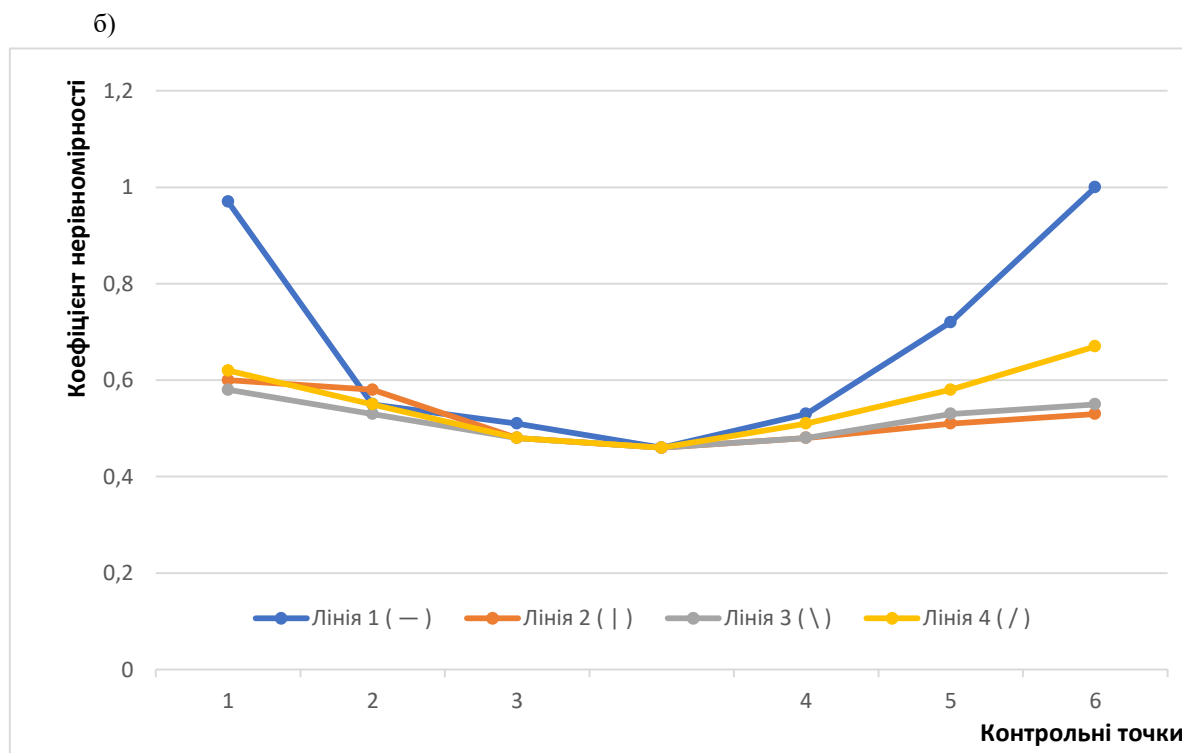


Рис. 5 – Графіки розподілу коефіцієнту нерівномірності деформації – при протягуванні за схемою “проходами” (а) та при протягуванні за схемою “по гвинту” (б).

Схема “по гвинту” покращує умови течії металу, зменшує концентрації напружень, усуває центральну зону недеформованого металу, підвищуючи якість поковок. Такий підхід дозволяє знизити ризик виникнення внутрішніх порожнин і тріщин, забезпечити однорідну структуру металу та покращити механічні властивості.

Висновки.

У ході дослідження встановлено, що кінематична схема ковальського протягування суттєво впливає на характер пластичної течії металу та рівномірність деформації при вільному куванні. Моделювання процесу в середовищі *QForm* показало, що схема “по гвинту” забезпечує більш рівномірний розподіл деформацій у поперечному перерізі заготовки порівняно з схемою “проходами”, зменшуючи різницю між максимальними та мінімальними значеннями інтенсивності деформації приблизно на 30%.

Отримані результати свідчать, що використання схеми “по гвинту” сприяє покращенню умов течії металу, зменшенню концентрацій напружень у центральній частині заготовки, підвищенню однорідності структури та загальної якості поковок.

Список літератури

1. Choi, S.K., Chun, M.S., Van Tyne, C.J., & Moon, Y.H. Optimization of Open-Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1 (2006), pp. 88–95. Advanced Steel Processing and Products Research Center, Colorado School of Mines, USA.
2. Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М. Теорія процесів обробки металів тиском. - Дніпропетровськ: Пороги, 2008. - 370 с.
3. Кальченко П.П., Марков О.Е. Новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок. - Краматорск: ДГМА, 2014. - 100 с.
4. Dyja H., Banaszek G., Mroz S., Berski S. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. - *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. - p. 131–137.
5. Cockcroft M.G., Latham D.J. “Ductility and workability of metals”, - *Inst Metals*, T. 96, №1, - p. 33-39.
6. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посіб. - Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. - 226 с.
7. Huda Z. Metal forming processes: fundamentals, analysis, calculations. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – 307 p.

8. Švajger M. Open die forging technology with failure analysis, – Ljubljana: SMR Premium GmbH; Infodoc S.r.l., 2023. – 207 p.
9. K.G. Kakandikar, A. Agrawal, D.R. Kumar. Metal forming processes: developments in experimental and numerical approaches – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 338 p.
10. Reinisch, N., Rudolph, F., Günther, S., Bailly, D., Hirt, G. Successful pass schedule design in open-die forging using double deep Q learning // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, No. 7. – Article 1084.
11. Технологічні процеси за фахом. Кування і штампування : навчальний посібник / В.В. Кухар, Б.С. Каргін, О.С. Аніщенко, С.Б. Каргін, А.Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2017. – 144 с.
12. Emerging Trend in Forging Operation Omolayo M. Ikumapayi, Esther T. Akinlabi, and Peter Onu (https://www.researchgate.net/publication/344006048_Emerging_Trend_in_Forging_Operation)
13. Якість металопродукції навч. посібник / Є. І. Шифрін, Є. І. Сокол, В. Л. Чухліб [та ін.] ; Нац. техн. ун-т “Харків. політехн. ін-т”. – Харків, 2025. – 415 с.
14. Кування і гаряче об’ємне штампування: Методичні рекомендації / Носуленко В. І., Мірзак В. Я. ; Міносвіти і науки України, Центральнoукраїнський нац. техн. ун-т, каф. обробки металів тиском та спецтехнологій. – Кропивницький : ЦНТУ, 2019. – 66 с.
15. Di Schino A. Open-die forging process simulation: a simplified industrial approach based on artificial neural network // *AIMS Materials Science*. – 2021. – №8(5): - p. 685–697.
16. Марков О., Хващинський А., Мусорін А., Маркова М., Лисенко А. Дослідження нового способу кування великих зливків на основі осадження профільованих заготовок / О. Марков, А. Хващинський, А. Мусорін, М. Маркова, А. Лисенко // *Технічні науки та технології*. - 2022. - № 1 (27). - С. 45-53р.
17. Ebrahimi R, Najafizadeh A (2004) A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *J Mater Process Technol* 152(2):136–143 p.
18. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Похиленко Г.М. Технологія обробки металів і сплавів тиском. - Видавничий центр НУБіП, Київ, 2020.– 60с.
19. Сівак Р.І. “Розвиток наукових основ механіки немонотонного пластичного деформування та удосконалення технологічних процесів обробки металів тиском” - Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук - Вінниця, 2018, 43с.
20. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2025).
21. Wang B., Han Y., Zeng W., Zhai Y. Improving the deformation uniformity within forgings by applying preform optimization based on FEM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, Vol. 223. - pp. 285–293.
22. Wolfgarten, M., Merklein, M., and Hirt, G. Analysis of Process Forces and Geometrical Correlations for Open-Die Forging with Superimposed Manipulator Displacements. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 276 (2020), Article No. 116408.
23. Чухліб В. Л., Ашкелянecь А. В., Губський С. О., Петров О. В., Дуванський О. М., Палієнко В. О., Окунь А. О. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Гідравлічні машини та гідроприводи. – 2021. – № 1 (1323). – С. 95–101.

References (transliterated):

1. Choi, S.K., Chun, M.S., Van Tyne, C.J., & Moon, Y.H. Optimization of Open-Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1 (2006), pp. 88–95. Advanced Steel Processing and Products Research Center, Colorado School of Mines, USA.
2. Danchenko V.M., Hrynkevych V.O., Holovko O.M. Teoriia protsesiv obrobky metaliv tyskom. - Dnipropetrovsk: Porohy, 2008. - 370 s.
3. Kalchenko P.P., Markov O.E. Novye tekhnolohycheskye protsessy kovky krupnykh pressovykh pokovok. - Kramatorsk: DHMA, 2014. - 100 s.
4. Dyja H., Banaszek G., Mroz S., Berski S. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. - *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. - r. 131–137.
5. Cockcroft M.G., Latham D.J. “Ductility and workability of metals”, - *Inst Metals*, T. 96, №1, - p. 33-39.
6. Diachenko S.S. Fizychni osnovy mitsnosti ta plastychnosti metaliv: navch. posib. - Kharkiv: Vydavnytstvo KhNADU, 2003. - 226 s.
7. Huda Z. Metal forming processes: fundamentals, analysis, calculations. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – 307 r.
8. Švajger M. Open die forging technology with failure analysis, – Ljubljana: SMR Premium GmbH; Infodoc S.r.l., 2023. – 207 p.

9. K.G. Kakandikar, A. Agrawal, D.R. Kumar. Metal forming processes: developments in experimental and numerical approaches – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 338 p.
10. Reinisch, N., Rudolph, F., Günther, S., Bailly, D., Hirt, G. Successful pass schedule design in open-die forging using double deep Q learning // Processes. – 2021. – Vol. 9, No. 7. – Article 1084.
11. Tekhnolohichni protsesy za fakhom. Kuvannia i shtampuvannia : navchalnyi posibnyk / V.V. Kukhar, B.S. Karhin, O.S. Anishchenko, S.B. Karhin, A.H. Prysiashnyi. – Mariupol : PDTU, 2017. – 144 s.
12. Emerging Trend in Forging Operation Omolayo M. Ikumapayi, Esther T. Akinlabi, and Peter Onu (https://www.researchgate.net/publication/344006048_Emerging_Trend_in_Forging_Operation)
13. Yakist metaloproduktii navch. posibnyk / Ye. I. Shyfrin, Ye. I. Sokol, V. L. Chukhlib [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv, 2025. – 415 s.
14. Kuvannia i hariache obiemne shtampuvannia: Metodychni rekomendatsii / Nosulenko V. I., Mirzak V. Ya. ; Minosvity i nauky Ukrainy, Tsentralnoukrainskyi nats. tekhn. un-t, kaf. obrobky metaliv tyskom ta spetstekhnolohii. – Kropyvnytskyi : TsNTU, 2019. – 66 s.
15. Di Schino A. Open-die forging process simulation: a simplified industrial approach based on artificial neural network // AIMS Materials Science. – 2021. – №8(5): - r. 685–697.
16. Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Markova M., Lysenko A. Doslidzhennia novoho sposobu kuvannia velykykh zlyvkiv na osnovi osadzhennia profilovanykh zahotovok / O. Markov, A. Khvashchynskyi, A. Musorin, M. Markova, A. Lysenko // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. - 2022. - № 1 (27). - S. 45-53r.
17. Ebrahimi R, Najafizadeh A (2004) A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. J Mater Process Technol 152(2):136–143 r.
18. Aftandilants Ye.H., Zazymko O.V., Pokhylenko H.M. Tekhnolohiia obrobky metaliv i splaviv tyskom. - Vydavnychiy tsentr NUBiP, Kyiv, 2020.– 60s.
19. Sivak R.I. "Rozvytok naukovykh osnov mekhaniky nemonotonnoho plastychnoho deformuvannia ta udoskonalennia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky metaliv tyskom" - Avtoreferat dysertatsii na здобuttia naukovoho stupenia doktora tekhnichnykh nauk - Vinnytsia, 2018, 43s.
20. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2025).
21. Wang B., Han Y., Zeng W., Zhai Y. Improving the deformation uniformity within forgings by applying preform optimization based on FEM. Journal of Materials Processing Technology, 2015, Vol. 223. - pp. 285–293.
22. Wolfgarten, M., Merklein, M., and Hirt, G. Analysis of Process Forces and Geometrical Correlations for Open-Die Forging with Superimposed Manipulator Displacements. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 276 (2020), Article No. 116408.
23. Chukhlib V. L., Ashkelianets A. V., Hubskeyi S. O., Petrov O. V., Duvanskyi O. M., Paliienko V. O., Okun A. O. Rozrobka tekhnolohichnoi kontseptsii proiektuvannia protsesiv kuvannia z urakhuvanniam vplyvu rezhymu deformuvannia na yakist pokovok // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Hidravlichni mashyny ta hidropryvody. – 2021. – № 1 (1323). – S. 95–101.

Надійшла (received) 12.11.2025

Відомості про авторів

Доля Володимир Сергійович (Dolia Volodymyr) - магістрант кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: volodymyr.dolia@mit.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0000-7354-2300

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: profdnepro@gmail.com

Бобров Олександр Геннадійович (Bobrov Oleksandr) - Старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: bobrov_ag@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8840-6405 .

Таран Ольга Василівна (Taran Olha) - Старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: olga_taran@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9143-5821.

М. В. ВОРОПАЄВ, О. В. НАБОКА

СУЧАСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ В МАШИНОБУДУВАННІ

У статті представлено систематизований огляд сучасних засобів вимірювальної техніки вітчизняних виробників, зокрема фірми «КОДА» (м. Харків), що здійснює поставки широкого спектру для корпорації Hexagon Metrology (бренд Tesa Technology). Огляд охоплює множину прецизійних вимірювальних приладів для потреб машинобудівного виробництва. Розглянуто конструктивні особливості, технічні характеристики та специфіку застосування таких засобів, як штангенциркулі, мікрометри, нутроміри, індикатори годинникового та важільного типу, інклінометри, висотоміри, профілометри, оптичні вимірювальні системи та трикоординатні вимірювальні мікроскопи. Особливу увагу приділено питанням метрологічного забезпечення, простежуваності результатів вимірювань та вимогам стандарту ISO 17025. Проаналізовано переваги пневматичних та індуктивних вимірювальних систем для потокового контролю. Стаття призначена для фахівців у галузі метрології, контролю якості та машинобудівного виробництва.

Ключові слова: Hexagon Metrology, Tesa Technology, засоби вимірювальної техніки, прецизійний контроль, нутроміри, мікрометри, штангенциркулі, індикатори, інклінометри, метрологічна простежуваність.

M. VOROPAIEV, O. NABOKA

MODERN SOLUTIONS FOR PRECISION CONTROL IN MECHANICAL ENGINEERING

The article presents a systematic review of modern measuring instruments of domestic manufacturers, in particular the company "KODA" (Kharkiv), which supplies a wide range of products to the Hexagon Metrology corporation (Tesa Technology brand). The review covers a variety of precision measuring instruments for the needs of machine-building production. The design features, technical characteristics and specifics of the application of such instruments as calipers, micrometers, internal gauges, dial and lever indicators, inclinometers, altimeters, profilometers, optical measuring systems and three-coordinate measuring microscopes are considered. Special attention is paid to the issues of metrological support, traceability of measurement results and the requirements of the ISO 17025 standard. The advantages of pneumatic and inductive measuring systems for flow control are analyzed. The article is intended for specialists in the field of metrology, quality control and machine-building production.

Keywords: Hexagon Metrology, Tesa Technology, measuring instruments, precision control, bore gauges, micrometers, calipers, indicators, inclinometers, metrological traceability.

Вступ.

Розвиток сучасного машинобудування невіддільно пов'язаний з підвищенням вимог до якості та точності виготовлення деталей і вузлів. В умовах цифровізації виробничих процесів, широкого застосування верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) та автоматизованих виробничих ліній особливої актуальності набуває питання метрологічного забезпечення виробництва – від вхідного контролю матеріалів до фінального приймального контролю готової продукції.

Серед провідних світових виробників засобів вимірювальної техніки в галузі геометричних вимірювань виділяються три основних гравці: японська компанія Mitutoyo, німецька Mahr та шведсько-американська Hexagon Metrology.

Кожна з цих корпорацій займає значну частку глобального ринку та пропонує широкий спектр рішень – від традиційних ручних засобів вимірювань до складних автоматизованих вимірювальних комплексів, але саме з останньою тісно співпрацює вітчизняна фірма «КОДА», що має можливість запропонувати замовникам як невеликі напівавтоматичні вимірювальні машини Hexagon Metrology TESA (Швейцарія), так і машини різних компонувань (портальні, стійкові, мостові) Hexagon Metrology DEA (Італія) з габаритами вимірюваних деталей до декількох десятків метрів.

Мета дослідження.

Метою даної статті є систематизований науково-технічний огляд засобів вимірювальної техніки, що розробляється вітчизняним постачальником для зовнішніх ринків.

Актуальність теми зумовлена необхідністю ознайомлення вітчизняних спеціалістів із сучасним рівнем розвитку вимірювальних технологій, виробленням чіткого розуміння принципів вибору вимірювальних засобів залежно від виробничих завдань, а також важливістю дотримання вимог міжнародних метрологічних стандартів.

3. Викладення основного матеріалу та результати.

Для реалізації визначеної мети необхідно проаналізувати конструктивні особливості, технічні характеристики та специфіку практичного застосування широкого спектра прецизійних вимірювальних приладів, серед яких штангенциркулі, мікрометри, нутроміри, індикатори годинникового та важільного типу, інклінометри, висотоміри, профілометри, а також оптичні та трикоординатні системи.

Важливим завданням є також дослідження питань метрологічного забезпечення, простежуваності результатів вимірювань відповідно до вимог стандарту ISO 17025 та оцінка переваг індуктивних і пневматичних систем для потокового контролю.

© М.В. Воропаєв, О.В.Набока. 2025

У процесі роботи застосовано методи науково-технічного огляду та систематизації даних щодо конструктивних та інноваційних рішень компанії, а також аналіз умов забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань до державних еталонів згідно з вимогами стандарту ISO/IEC 17025.

Корпорація Hexagon Metrology є глобальним лідером у галузі вимірювальних технологій та метрологічних рішень. У складі корпорації функціонують такі визнані бренди, як Tesa Technology (Швейцарія), Leica Geosystems, DEA (Італія – трикоординатні вимірювальні машини), а також виробники сканерів (Франція) та інші спеціалізовані підрозділи. Корпоративна мережа налічує підрозділи та представництва на всіх континентах: в Європі, Північній та Південній Америці, Азії (Китай, Японія), Африці.

Корпоративний слоган Tesa Technology – "When you need to be sure" ("Коли вам необхідно бути впевненими") – відображає ключову ідеологію компанії: кожен засіб вимірювань повинен забезпечувати надійний, точний та повторюваний результат незалежно від умов застосування. Компанія виокремлює п'ять основних причин обрати її продукцію:

— Використання виключно високоякісних матеріалів: зносостійкі загартовані сталі спеціальних сортів, графітові та скляні компоненти для відповідних застосувань.

— Гарантована точність у повному діапазоні вимірювань: точність, прописана в специфікації, зберігається в будь-якій точці діапазону та в будь-яких нормованих умовах.

— Застосування сучасних технологій: мікроелектроніка, 3D-друк для виготовлення прецизійних компонентів, інтерферометричні шкали тощо.

— Метрологічна простежуваність: кожен засіб вимірювання постачається з протоколом заводського калібрування або сертифікатом калібрування акредитованої лабораторії відповідно до вимог ISO/IEC 17025.

— Довготривала надійність: задокументовані випадки підтримання мікрометрів та штангенциркулями своєї метрологічної придатності протягом 20 і більше років інтенсивної експлуатації.

Забезпечення метрологічної простежуваності є одним із ключових принципів роботи компанії. Відповідно до вимог стандарту ISO/IEC 17025 усі засоби вимірювань – від простих мікрометрів до складних координатних машин – постачаються з підтверджуючими документами, що встановлюють ланцюжок простежуваності до державних еталонів.

Ручні засоби вимірювань.

Штангенциркулі. Штангенциркуль є одним із найрозповсюдженіших і найпізнаваніших засобів вимірювальної техніки в машинобудуванні. Tesa Technology пропонує широку лінійку штангенциркулів – від класичних ноніусних до сучасних електронних моделей із захистом від пилу та вологи на рівні IP67.

Електронні штангенциркулі Tesa демонструють здатність проводити вимірювання в агресивних умовах: у воді, при контакті з льодом, при вимірюванні м'яких матеріалів. Точність позиціонування електронних штангенциркулів у діапазоні до 200 мм досягає $\pm 0,01$ мм (10 мкм).

Однією з інноваційних розробок компанії є полегшені штангенциркулі великих розмірів. Якщо традиційний сталевий штангенциркуль завдовжки 2 м важить від 10 до 18 кг, то аналогічний прилад із вуглецевого волокна (CFRP) важить лише близько 3,3 кг завдяки застосуванню легких вуглецевих матеріалів і спеціальних конструктивних рішень. Це дозволяє одному оператору проводити вимірювання без застосування підйомних механізмів, що суттєво підвищує продуктивність та ергономіку праці.

Мікрометри. Мікрометри Tesa Technology вирізняються запатентованою технологією перетворення кутового переміщення в лінійне, що забезпечує точність вимірювань на рівні 1 мкм у діапазоні до 600 мм. Це суттєво перевищує можливості традиційних мікрометрів, де забезпечення мікронної точності обмежується значно меншими діапазонами.

Принципово важливою особливістю є те, що мінімальний діапазон вимірювань мікрометрів Hexagon становить 0–30 мм, тоді як у конкурентів (Mitutoyo, Mahr) цей діапазон традиційно складає 0–25 мм. Дане рішення зумовлене практичними вимогами машинобудування: значна частина токарних деталей має розміри в межах 25–30 мм, а також необхідністю вимірювання розмірів, близьких до 1 дюйма (25,4 мм), що є стандартним розміром у дюймовій системі, широко вживаній при нарізуванні різей.

Технічна складність розширення діапазону мікрометра пов'язана з тим, що стандартний крок вимірювального гвинта становить 0,5 мм, і забезпечення рівномірної мікронної точності на всьому ході гвинта є вкрай складним конструктивним завданням. Запатентована технологія Tesa дозволяє вирішити цю проблему.

Нутроміри. В асортименті Hexagon Metrology представлено декілька типів нутромірів для вимірювання внутрішніх діаметрів:

Двоточкові нутроміри традиційно застосовуються для вимірювання внутрішніх діаметрів на невеликих глибинах (до 100–200 мм). Похибка вимірювання двоточковим нутроміром складає від 4 до 10 мкм залежно від ціни поділки відлікового пристрою. Навіть при застосуванні нутроміра з ціною поділки 1–2 мкм загальна інструментальна похибка результату вимірювання становить не менше 6 мкм, що регламентується технічними умовами і відповідними ГОСТ.

Триточкові нутроміри є власною розробкою компанії Hexagon і призначені для вимірювань з похибкою 1 мкм. Конструкція з трьома вимірювальними контактами, розташованими під кутом 120° один до одного, реалізована за допомогою спеціалізованого механізму позиціонування. Це дозволяє: уникнути перекосів і швидкого зносу вузла; мінімізувати мертвий хід вимірювальної ніжки; забезпечити самоцентрування в отворі.

Для збільшення глибини вимірювання система Tesa MICRO оснащується спеціальними сталевими подовжувальними вставками (довжиною 100, 150, 500 та до 1000 мм), що дозволяє вимірювати на глибині до кількох сотень міліметрів залежно від діапазону приладу. Слід зазначити, що подовжувачі виготовляються зі

сталі (а не вуглецевого волокна), оскільки передача крутного моменту через мікрометричний механізм вимагає відповідної жорсткості матеріалу.

Для вимірювання надвеликих діаметрів (понад 1 м, аж до 32 м і більше), що характерно для енергетичного та аерокосмічного машинобудування, Hexagon пропонує спеціальні двоточкові нутроміри з додатковими вимірювальними наконечниками, що забезпечують точність 2–3 мкм. Конструктивно вставки виконані з карбонових матеріалів, що робить їх стійкими до температурних деформацій.

Індикатори та відлікові пристрої.

Індикатори годинникового типу. Швейцарія традиційно є визнаним лідером у виробництві прецизійних механічних систем, і годинникова техніка займає в цьому особливе місце. Саме швейцарські майстри заклали основи виробництва точних механізмів, які пізніше перейняли японські виробники. Tesa Technology успадкувала ці традиції і виробляє індикатори годинникового типу з ціною поділки 1 мкм та загальною похибкою не більше 2 мкм на ході 12,5 мм.

Поряд із традиційними механічними моделями, Tesa Technology розробила інноваційну технологію електронних індикаторів. В них шток переміщує спеціальну решітку вздовж прецизійної інтерферометричної електронної шкали, що дозволяє досягти відліку в 1 мкм. Ці компоненти виготовлені із застосуванням нанометрових технологій. Заводські серійні номери таких індикаторів сягають восьмизначних чисел, що свідчить про надзвичайно широке їх розповсюдження у виробництві.

Важільні індикатори. Важільні індикатори знайшли широке застосування при визначенні відхилень форми та розташування поверхонь: радіального биття, відхилення від прямолінійності, площинності, співвісності. Tesa Technology є одним із небагатьох виробників, що пропонують електронні важільні індикатори з точністю 1 мкм і діапазоном вимірювань близько 0,2 мм.

Серед конкурентів подібну точність забезпечують лише провідні європейські виробники вимірювального інструменту (зокрема чеська компанія Somet/Kinex) та сама Tesa, проте саме продукти під брендом Tesa вважаються еталоном у цьому сегменті. Типова область застосування – налагодження металорізальних верстатів: перевірка паралельності напрямних, прямолінійності кулькогвинтових пар (ШВП), а також монтаж і юстирування вузлів верстатів із ЧПК, де необхідно забезпечити паралельність або прямолінійність на рівні 10 мкм на метр ходу каретки.

Вимірювальні стійки. Вимірювальні стійки Hexagon Metrology є прецизійними базовими пристроями для монтажу відлікових пристроїв і проведення відносних вимірювань. Ключові характеристики: рух колони з мікронною точністю, мікроподача з переміщенням на висоту до 300 мм, допуск виготовлення колони менше 1 мкм. Рейкова направляюча, на відміну від конкурентів, виведена за межі колони, що забезпечує рівноваженість системи та відсутність перекосів при переміщенні відлікового пристрою.

Важливою особливістю стійок Hexagon є уніфіковані кріпильні системи, які дозволяють встановлювати відлікові пристрої різних виробників. Стійки використовують загартований сплавний чавун як матеріал колони – з нормалізованими деформаціями і стабільними геометричними параметрами.

Електронні інклінометри та вимірювання кута нахилу.

Електронні інклінометри (рівні) Tesa Technology серії CLINOBEVEL (моделі Clinobevel 1 USB, 2 та 3) є унікальними засобами вимірювань з похибкою 1 мкм/м, що відповідає куту менше однієї кутової секунди. Для ілюстрації: розрізнення об'єкта розміром із футбольний м'яч на відстані близько 30 км відповідає приблизно одній кутовій хвилині, тобто точність інклінометра є ще на порядок вищою.

Застосування інклінометрів надзвичайно широке в контрольно-вимірювальній практиці машинобудування:

— Контроль площинності гранітних повірочних плит – базового елемента будь-якого вимірювального лабораторного обладнання.

— Перевірка горизонтальності та прямолінійності направляючих токарних, фрезерних та шліфувальних верстатів.

— Калібрування та атестація верстатів із ЧПК, у тому числі з поворотними столами (понад сім осей позиціонування).

— Контроль кутів нахилу вузлів складних виробничих установок.

Порівняно з традиційним автоколіматорним методом (наприклад, з використанням автоколіматора Taylor Hobson), який вимагає значних фінансових витрат і є складним в обслуговуванні, застосування електронних інклінометрів Tesa дозволяє досягти аналогічної точності при суттєво меншій вартості обладнання. Метод застосування інклінометрів визнаний стандартом ISO як один із допустимих методів контролю точності верстатів. Діапазон вимірювань на базисах до 30 м дозволяє перевіряти великогабаритні верстати і споруди.

Кінцеві міри довжини та калібри.

Кінцеві міри довжини. Кінцеві міри довжини (КМД) є первинними еталонами довжини в машинобудівному виробництві. Tesa Technology виготовляє КМД класу К – найвищого класу відповідно до стандарту ISO 3650. Класифікація передбачає класи К, 0, 1, 2 за спаданням точності; в умовах виробництва застосовуються також класи 3 і 4, проте нижче четвертого класу КМД не використовуються.

Особливістю продукції Tesa є титанові кінцеві міри, які мають підвищену зносостійкість, корозійну стійкість і застосовуються безпосередньо у виробничих умовах як робочі еталони. КМД класу К

використовуються виключно для калібрування та передачі розміру в повірочних та калібрувальних лабораторіях.

Компаратори кінцевих мір. Компаратор кінцевих мір Tesa Technology є унікальним метрологічним інструментом, що дозволяє проводити калібрування КМД від нульового до другого класу точності включно. Похибка вимірювання при цьому становить менше 2 мкм. Умовою досягнення такої точності є застосування термостабілізованих лабораторій (температура $20 \pm 0,1$ °C), використання відповідних еталонів з підтверженою простежуваністю до національних стандартів та висококваліфікований персонал.

Калібри. Допусковий контроль за допомогою калібрів, попри розвиток кількісних методів вимірювань, залишається актуальним і широко застосовуваним в серійному та масовому виробництві. Переваги методу: висока оперативність контролю, відносно невисока собівартість, незалежність результату від кваліфікації оператора. Tesa Technology пропонує повну гаму калібрів – гладких, різьбових, конусних, а також широкий спектр калібрувального обладнання для їх атестації (довжиноміри, вертикальні довжиноміри, калібратори).

Контроль шорсткості поверхні та висотоміри.

Профілометри та контроль мікрогеометрії. Tesa Technology випускає профілометри щупового (контактного) переносного типу для вимірювання параметрів шорсткості поверхні. Прилади підтримують повний спектр сучасних стандартизованих параметрів шорсткості: Ra (середнє арифметичне відхилення профілю), Rz (висота нерівностей за десятьма точками), Rz5, Rq, Rmr (опорна крива профілю) та інші параметри, що описують функціональні властивості поверхні.

Сучасний підхід до оцінки мікрогеометрії поверхні передбачає застосування розвиненого математичного апарату для фільтрації, цифрової обробки та аналізу профілограми. Програмне забезпечення профілометрів Tesa забезпечує підтримку міжнародних стандартів (ISO, DIN, JIS, ANSI) щодо визначення базової довжини, методів фільтрації та обчислення параметрів.

Висотоміри. Висотоміри Tesa серії 600 та 700 являють собою однокоординатні вимірювальні машини, що базуються на гранітній плиті. На відміну від традиційних штангенрейсмусів із точністю 0,02–0,05 мм, висотоміри Tesa мають дискретність відліку 0,1 мкм та повторюваність 1 мкм. Важливо розрізнити дискретність відліку та реальну точність: максимальна допустима похибка (MPE) для MICRO-NITE 600 визначається формулою $2 + 2L/1000$ мкм, що для вимірювання на висоті 600 мм становить близько 3,2 мкм.

Унікальна конструктивна особливість – рух на повітряній подушці: прилад ковзає по поверхні гранітної плити, що забезпечує практично безтертєве переміщення і виключає пошкодження базової поверхні. Функціональні можливості: вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів, циліндрів, отворів, перевірка овальності. Система широко застосовується в лабораторіях якості верстатобудівних і приладобудівних підприємств.

Оптичні та мультисенсорні вимірювальні системи.

Оптичні сканери для тіл обертання. Для автоматизованого контролю деталей типу «тіло обертання» (вали, шнекові і зубчаті поверхні тощо) Tesa Technology пропонує оптичні сканери, що працюють за принципом тінювого контролю. Вбудоване програмне забезпечення дозволяє, маючи CAD-модель або цифрове креслення деталі, автоматично провести вимірювання та визначити відхилення від номіналу.

Проектор циліндричних поверхонь Tesa дозволяє нахилити деталь відносно базової осі на кут до 30° для сканування складнопрофільних поверхонь. Програмне забезпечення автоматично перераховує виміряні розміри з аксонометричної до ортогональної системи координат. Це суттєво спрощує контроль деталей зі шліцьовими, зубчастими поверхнями і нарізками.

Алгоритми сканування, що застосовуються в системах Tesa, є результатом значних інвестицій у дослідження та розробки. Вони стали основою для сучасних технологій 3D-сканування та зворотного інжинірингу.

Мультисенсорні вимірювальні мікроскопи. Вимірювальні мікроскопи серії TESA-VISIO 300 і TESA-VISIO 200 (у модифікаціях GL або DCC) є мультисенсорними системами, що поєднують тактильний (контактний) і оптичний (безконтактний у відбитому та прохідному світлі) методи вимірювань. Реальна гарантована точність (MPE) для TESA-VISIO 300 визначається формулою $3 + 10L/1000$ мкм (де L — вимірювана довжина в мм), що для діапазону 300 мм становить близько 6 мкм. Системи серії TESA-VISIO 200 є тривимірними: завдяки сенсору перефокусування вони дозволяють вимірювати висотні координати (вісь Z).

Потреба в безконтактних оптичних вимірюваннях зумовлена рядом виробничих ситуацій: вимірювання тонких або м'яких матеріалів, що деформуються при дотику; контроль об'єктів з малими поверхнями торкання (отвори в друкованих платах); контроль деталей, що не повинні зазнавати деформації; вимірювання в прохідному або відбитому світлі для визначення розмірів прозорих елементів.

Унікальна технологія безлюфтової мікроподачі переміщення стола дозволяє позиціонувати з точністю 1 мкм на всьому діапазоні переміщення 200–300 мм, тоді як традиційні мікроскопи забезпечують точне мікропереміщення лише в межах 10–20 мм. Програмне забезпечення відрізняється інтуїтивним інтерфейсом, підтримкою 3D-вимірювань та багатомовністю (в тому числі українська мова). Навчання оператора займає лише 4 години.

Індуктивні щупи та пневматичні вимірювальні системи.

Індуктивні щупи для вбудованого контролю. Індуктивні щупи Tesa Technology є основою для побудови вимірювальних систем вбудованого (автоматичного) контролю розмірів безпосередньо на виробничій лінії. Характеристики: дискретність відліку 1 мкм, похибка вимірювання 1–2 мкм. На основі цих щупів можна сконфігурувати вимірювальний пристрій під будь-яку геометрію деталі.

Метод налагодження – шаблонний (компаративний): налагодження проводиться по еталонному зразку, після чого пристрій готовий до масового контролю в серійному виробництві. Прикладом є контроль складних деталей типу шпильки з посадковими поверхнями, де всі допустимі відхилення знаходяться на рівні 2–10 мкм. Подібні системи застосовуються у виробництві паливної апаратури та інших прецизійних виробів підприємствами типу «Мотор Січ», «Турбоатом» тощо.

Пневматичні (повітряні) вимірювальні системи. Tesa Technology є визнаним лідером у галузі пневматичних (ротаметричних) вимірювальних систем для прецизійного контролю внутрішніх діаметрів. Точність таких систем – менше 0,5 мкм. Принцип дії: зміна витрати або тиску стисненого повітря при зміні зазору між вимірювальним калібром і поверхнею отвору.

Переваги пневматичних систем: висока оперативність і повторюваність контролю; менша чутливість до температурних деформацій порівняно з контактними методами; можливість встановлення безпосередньо поруч із токарним або шліфувальним верстатом; практично автоматичний режим контролю в потоці виробництва. Пневматичні системи традиційно застосовуються при виробництві прецизійних деталей паливної апаратури, гідравліки, після операцій хонінгування та шліфування внутрішніх поверхонь.

Трикоординатні вимірювальні системи.

Окремим і найважливішим напрямком діяльності корпорації Hexagon є виробництво трикоординатних вимірювальних машин (КВМ). Підрозділ DEA (Італія) та бренд Leica є лідерами в цьому сегменті: КВМ Hexagon/Leica використовуються в більшості провідних повірочних і калібрувальних лабораторій світу – РТВ (Німеччина), NIST (США), JCSS (Японія) та інших.

Tesa Technology пропонує власні трикоординатні мікроскопи з ходом по координаті Y до 500 мм і точністю вимірювань на рівні 0,1–0,5 мкм. Головна умова досягнення такої точності – термостабілізована вимірювальна кімната з температурою $20 \pm 0,1$ °C. Важливо зазначити: витрати на обладнання та підтримання термостабілізованого приміщення можуть у 2–3 рази перевищити вартість самої КВМ, що є суттєвим інфраструктурним чинником при плануванні придбання таких систем.

Лазерна інтерферометрія та перевірка точності верстатів.

Для перевірки точності верстатів з ЧПК застосовуються лазерні інтерферометри, зокрема системи Renishaw XL80. Ці системи дозволяють визначати: точність позиціонування і повторюваності позиціонування по лінійних осях; кутову точність (нишкання, тангаж, крен); перпендикулярність між осями; точність виходу в точку.

Лазерний інтерферометр забезпечує вимірювання в субмікронному діапазоні на довжинах до 80 м (практично застосовуваний діапазон з відповідною оптикою – до 30 м). Представники компанії Hexagon виїжджають до замовників для проведення метрологічної атестації верстатів і пошуку причин погіршення точності обробки.

Окремо слід відзначити системи Renishaw QC20 Ballbar для контролю геометричної точності верстатів за круговою траєкторією – визначення похибок приводів, зазорів, компенсації. Темі лазерної інтерферометрії та контролю точності зубчастих коліс на КВМ заплановані як окремі розгорнуті лекційні теми в навчальному курсі.

Висновки.

Проведений огляд засобів вимірювальної техніки демонструє, що сучасна геометрична метрологія пропонує вичерпний арсенал засобів для вирішення практично будь-якої вимірювальної задачі в машинобудуванні – від простого оперативного контролю розмірів штангенциркулем до ультрапрецизійних вимірювань на трикоординатних машинах у термостабілізованих лабораторіях.

Ключовими тенденціями розвитку вимірювальної техніки, що знайшли відображення в продуктах Hexagon Metrology, є: підвищення ступеня автоматизації та інтеграції вимірювальних систем у виробничий процес; розширення функціональних можливостей приладів (від контактних до безконтактних, від одновимірних до тривимірних); підвищення вимог до метрологічного забезпечення та простежуваності результатів відповідно до ISO/IEC 17025; застосування новітніх матеріалів (вуглецеві волокна, прецизійна кераміка) для зниження маси та температурних ефектів; розробка інтуїтивних програмних інтерфейсів для спрощення роботи операторів.

Правильний вибір засобу вимірювань для конкретного виробничого завдання вимагає розуміння: необхідної точності і повторюваності вимірювань; діапазону вимірювань і геометрії виробу; умов виробничого середовища (температура, вібрація, ЗМО); продуктивності контролю та кваліфікації операторів; вимог до метрологічної простежуваності і документування.

Зроблено висновок, що вітчизняна продукція відповідає найвищим міжнародним стандартам якості та метрологічної точності, а її застосування у вітчизняному машинобудуванні є ефективним шляхом підвищення якості продукції та конкурентоспроможності підприємств.

Список літератури:

1. International Organization for Standardization. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017) // Geneva: ISO, 2017.
2. International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks (ISO 3650:1998) // Geneva: ISO, 1998.
3. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out (ISO 1101:2017) // Geneva: ISO, 2017.
4. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO 10360-2:2009) // Geneva: ISO, 2009.
5. TESA Technology. General Catalogue: Precision Measuring Instruments // Renens, Switzerland: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2024.
6. Hexagon Manufacturing Intelligence. Whitepaper: Modern CMM design concepts // Hexagon AB.
7. Mussatayev M., Huang M., Nurtas M., Arynov A. Improved calibration uncertainty assessment technique in coordinate metrology considering thermal influences // Metrology and Measurement Systems. Vol. 28. No. 4. 2021. С. 609–626. DOI: 10.24425/mms.2021.137699.
8. Харченко С., Самборський С., Чайка А., Лелень М., Вуйтович А., Клоніца М., Жечковський Я. Удосконалення процесу вимірювання розмірів прецизійних отворів складної геометрії // Metrology and Measurement Systems. Т. 32. № 4. 2025. С. 1-20. DOI: 10.24425/mms.2025.155810.
9. Michalski R., Wieczorowski M., Glazowski P.J., Gapiński B. Analysis of the Influence of Support During Measurement Using Coordinate Measuring Techniques // Advances in Science and Technology. Research Journal. Vol. 13. No. 4. 2019. С. 22-29. DOI: 10.12913/22998624/113608.
10. Захаров І. та ін. Виразження калібрувальних та вимірювальних можливостей акредитованих калібрувальних лабораторій у діапазоні вимірювань // Український метрологічний журнал. № 4. 2024. С. 11-18. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2024.318879.
11. Новоселов О. Оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування металевих еталонних мір // Український метрологічний журнал. № 3. 2024. С. 22-29.

References (transliterated)

1. International Organization for Standardization. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017) // Geneva: ISO, 2017.
2. International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks (ISO 3650:1998) // Geneva: ISO, 1998.
3. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out (ISO 1101:2017) // Geneva: ISO, 2017.
4. International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO 10360-2:2009) // Geneva: ISO, 2009.
5. TESA Technology. General Catalogue: Precision Measuring Instruments // Renens, Switzerland: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2024.
6. Hexagon Manufacturing Intelligence. Whitepaper: Modern CMM design concepts // Hexagon AB.
7. Mussatayev M., Huang M., Nurtas M., Arynov A. Improved calibration uncertainty assessment technique in coordinate metrology considering thermal influences // Metrology and Measurement Systems. Vol. 28. No. 4. 2021. С. 609–626. DOI: 10.24425/mms.2021.137699.
8. Kharchenko S., Samborski S., Czajka A., Lelen M., Wójtowicz A., Klonica M., Rzeczkowski J. Improvement of the process of measuring the dimensions of precision holes of complex geometry // Metrology and Measurement Systems. Vol. 32. No. 4. 2025. С. 1-20. DOI: 10.24425/mms.2025.155810.
9. Michalski R., Wieczorowski M., Glazowski P.J., Gapiński B. Analysis of the Influence of Support During Measurement Using Coordinate Measuring Techniques // Advances in Science and Technology. Research Journal. Vol. 13. No. 4. 2019. С. 22-29. DOI: 10.12913/22998624/113608.
10. Zakharov I. et al. Expression of calibration and measurement capabilities of accredited calibration laboratories in a measurement range // Ukrainian Metrological Journal. № 4. 2024. С. 11-18. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2024.318879.
11. Novoselov O. Evaluation of the measurement uncertainty during the calibration of metal reference gauges // Ukrainian Metrological Journal. № 3. 2024. С. 22-29.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Воропаєв Мирослав Вячеславович (Myroslav Voropaiev) - 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 (Olena Naboka) - 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

БІРЮКОВ С. В., ГУБСЬКИЙ С. О., ІЛЛЕНКО К. В., ГОРБАЧ С. Д., ГОВОРУН В. В.

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВІШУВАННЯ РЕДУКТОРІВ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНІВ, ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ ТА НИЗЬКОПІДЛОГОВИХ ТРАМВАЇВ

Дана стаття присвячена огляду конструкцій кріплення тягового редуктора до рами візка, які застосовуються на рухомому складі вагонів метрополітену, високошвидкісних електропоїздів та трамваїв. Також розглянуто різні конструкції підвішування редукторів, що виробляються компанією Siemens Mobility – однією з найбільших у світі виробників рухомого складу та його компонентів.

У статті висвітлюються відмінності між тяговими передачами різних класів та типи рухомого складу, на яких вони експлуатуються. Наголошується на важливості кронштейнів кріплення, які приварюються до рами візка, що є несучою конструкцією для тягового та гальмівного обладнання.

Одним із найважливіших вузлів конструкції візка рейкового рухомого складу є вузол підвішування тягової передачі. Від надійності його конструкції залежить не тільки безпека руху, а й стабільність роботи всього моторно-осьового блоку. Кронштейни підвішування мають різну геометричну форму та конструкцію, в залежності від типу рухомого складу та потужності його тягового приводу. В статті розглянуто різні види кронштейнів, які є елементами конструкції підвішування редуктора, за допомогою яких відбувається кріплення його до рами візка. Розглянуто приклади використання пружних та шарнірних елементів у конструкції підвішування тягового редуктора, які використовуються для ефективного поглинання реактивних моментів, зниження рівня шуму і пом'якшення ударів під час руху транспортного засобу по колії, а також компенсування неспіввісності вала двигуна та шестерні редуктора в залежності від положення рами візка відносно тягової передачі при статичному та динамічному навантаженні. Також зроблено висновки щодо аналізу конструктивних рішень підвішування редуктора на рухомому складі з тяговою передачею різних класів.

Ключові слова: рейковий рухомий склад, вагон метрополітену, трамвай, візок, тягова передача, підвішування редуктора, кронштейн підвішування.

BIRUKOV S., HUBSKYI S., ILLIENKO K., HORBACH S., HOVORUN V., KLYMENKO V.

ANALYSIS OF SUSPENSION STRUCTURES OF REDUCERS ON ROLLING STOCK OF METROPOLITANS, HIGH-SPEED TRAINS AND LOW-FLOOR TRAMWAYS

This article is devoted to a review of the structures of fastening the traction reducer to the bogie frame, which are used in the rolling stock of subway cars, high-speed electric trains and trams. Also considered are various designs of suspension of reducers, manufactured by Siemens Mobility - one of the world's largest manufacturers of rolling stock and its components.

The article highlights the differences between traction drives of different classes and the types of rolling stock on which they are operated. The importance of the mounting brackets, which are welded to the bogie frame, which is the supporting structure for traction and braking equipment, is emphasized.

One of the most important nodes of the design of the bogie of rail rolling stock is the traction drive suspension node. Not only the safety of movement, but also the stability of the entire motor-axle unit depends on the reliability of its design. Suspension brackets have different geometric shapes and designs, depending on the type of rolling stock and the power of its traction drive. The article considers different types of brackets, which are elements of the suspension design of the reducer, with the help of which it is attached to the bogie frame. Examples of the use of elastic and hinged elements in the suspension design of the traction reducer are considered, which are used to effectively absorb reactive moments, reduce noise and mitigate shocks when the vehicle moves along the track, as well as compensate for the misalignment of the engine shaft and the gear of the reducer depending on the position of the bogie frame relative to the traction transmission under static and dynamic loads. Conclusions are also drawn on the analysis of design solutions for suspension of the reducer on rolling stock with traction transmission of different classes.

Keywords: rail rolling stock, subway car, tram, trolley, traction transmission, gearbox suspension, suspension bracket.

Вступ. Залізниця є основою транспортної інфраструктури в багатьох країнах завдяки своїй надійності, пропускній здатності та ефективності. Відповідно рухомий склад, що експлуатується на залізниці, має задовольняти всім критеріям, щоб забезпечувати безпечні перевезення пасажирів та вантажів. Його конструкція повинна мати мінімальні витрати на експлуатацію та обслуговування, довговічність та якомога менше впливати на навколишнє середовище. Ці аспекти є не менш важливими, ніж сама безпека, і в сукупності визначають ефективність та економічну доцільність використання транспортного засобу.

Зокрема конструкція ходової частини рухомого складу напряму впливає на його надійність, динаміку та експлуатаційні характеристики. Візок рейкового транспорту має досить складну конструкцію, яка залежить від роду служби: пасажирський, вантажний або промисловий рухомий склад, а також від типу: локомотиви або моторвагонний рухомий склад. Так, візки залізничних локомотивів мають більш масивну та міцну конструкцію, в порівнянні з візками електропоїздів метрополітену та трамваїв, оскільки рухомий склад залізниць перевозить значно більші вантажі, має більші габаритні розміри та вагу, відповідно його ходова частина сприймає більші статичні та динамічні навантаження, що зумовлює застосування на ньому більш потужного тягового приводу, що неодмінно накладає певні умови на конструкцію вузлів підвішування елементів приводу та рами візка в цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тягова передача візка та її несправності, що виникають через вібрації та втомні тріщиноутворення в конструкції є актуальною проблемою на рейковому рухомому складі, яка досліджується інженерами та науковцями по всьому світу. Так через недосконалість конструкції кріплення двигуна та недостатні заходи щодо її послаблення можуть виникати втомні тріщини в рамі візка, що досліджувалося на рухомому складі метрополітену [1]. На високошвидкісних поїздах досліджувалася проблема тріщиноутворення в корпусі редукторів, що виникала через вібрації, які пов'язані із нерівністю колії, деформацією колісних пар [2] та не досить якісною технологією лиття корпусів [3].

Також на втомну міцність корпусів редукторів можуть впливати навіть незначні напруження в зубчастому зачепленні шестерень [4], що потребує уваги кваліфікованих спеціалістів при проектуванні редукторів та їх корпусів для різних типів рухомого складу залізниць [5] та високошвидкісних ліній.

Несправності тягової передачі пов'язані з динамічними навантаженнями на ходову частину рухомого складу, тому для зниження цих навантажень застосовують первинний та вторинний ступені підвищення вузлів візка [6, 7, 8]. Ресорне та пневматичне підвищення в комплексі із надійною конструкцією підвищення тягової передачі забезпечує зменшення невідресореної маси, мінімізацію вібрацій і ударних навантажень на елементи колії та кузов вагона, підвищення безпеки руху, плавності ходу та комфорту пасажирів, а також подовження терміну служби як самої передачі, так і ходової частини в цілому.

Метою статті є проаналізувати технічні рішення щодо конструкцій підвищення тягового редуктора, які застосовуються на різних типах рейкового рухомого складу, зокрема на електропоїздах метрополітену, низькопідлогових трамваях та високошвидкісних електропоїздах. Також детально дослідити конструкцію кронштейнів кріплення підвищення до рами, адже при експлуатації виникає тріщиноутворення в елементах кронштейну та місцях його приєднання до рами візка. Оскільки тягова передача є одним з основних компонентів візка, пошук шляхів поліпшення її кріплення є актуальною задачею в сучасному вагонобудуванні та критично важливим для забезпечення надійної роботи тягового приводу та його передачі.

Основна частина. Одним із найважливіших елементів будь якого візка рейкового транспорту є його рама, яка слугує для передачі та розподілення вертикального навантаження між колісними парами, а також для сприйняття і передачі на раму кузова тягових та гальмівних зусиль. Саме на рамі візка кріпляться елементи тягової передачі, за допомогою якої відбувається передача обертального моменту від вала тягового двигуна до колісної пари. Тягова передача, в залежності від конструкції, окрім електродвигуна та колісної пари, також може включати в себе редуктор та тягову муфту.

В залежності від місця кріплення двигуна та редуктора на візку, тягові передачі класифікують за трьома класами [9]:

- привод I класу – має опорно-осьове підвищення двигуна та редуктора;
- привод II класу – опорно-рамне підвищення двигуна та опорно-осьове підвищення редуктора;
- привод III класу – опорно-рамне підвищення двигуна та редуктора.

Тягові передачі I класу здебільшого характерні для залізничних локомотивів, що задіяні у вантажному русі [10]. Такі передачі мають просту конструкцію, в порівнянні з іншими класами, але також мають значну невідресорену вагу тягового приводу, що негативно впливає на його динаміку.

Передачі II класу експлуатуються на пасажирському рухомому складі, а також на вагонах метрополітену. В них невідресорена вага приводу зменшується, за рахунок рамного підвищення тягового двигуна.

Тягові передачі III класу мають досить складну конструкцію, але значною мірою знижують динамічний вплив рейкової колії на тяговий привод. Вони застосовуються на високошвидкісному рухомому складі, на сучасних локомотивах та моторних вагонах електропоїздів метрополітену сучасних серій.

При проектуванні конструкції візка особливу увагу приділяють кронштейнам кріплення тягових двигунів та редукторів, оскільки саме вони сприймають силові навантаження від крутного моменту двигуна та динамічних сил, що виникають під час руху поїзда. Ці кронштейни мають складну форму, що забезпечує оптимальний розподіл навантажень і мінімізує концентрацію напружень у певних точках.

На візках рухомого складу метрополітену моделей ЕЖ 3, 81-717/714 застосовано тягову передачу II класу, відповідно це рамне підвищення тягового двигуна та опорно-осьове підвищення редуктора. На рамі візка вагону метрополітену розташовані всі кронштейни кріплення його вузлів [11]: на поздовжніх балках - кронштейни кріплення важелів гальмівної-важільної передачі, гальмівних циліндрів, блок-гальма, кронштейни для кріплення повідців (для рам з повідцевим буксовим підвищенням), гідравлічного гасителя коливань; на поперечних - кріплення тягових двигунів, підвіски редукторів, кріплення комплексного запобіжного пристрою, кріплення запобіжних скоб центрального підвищення та інш. (рисунок 1).

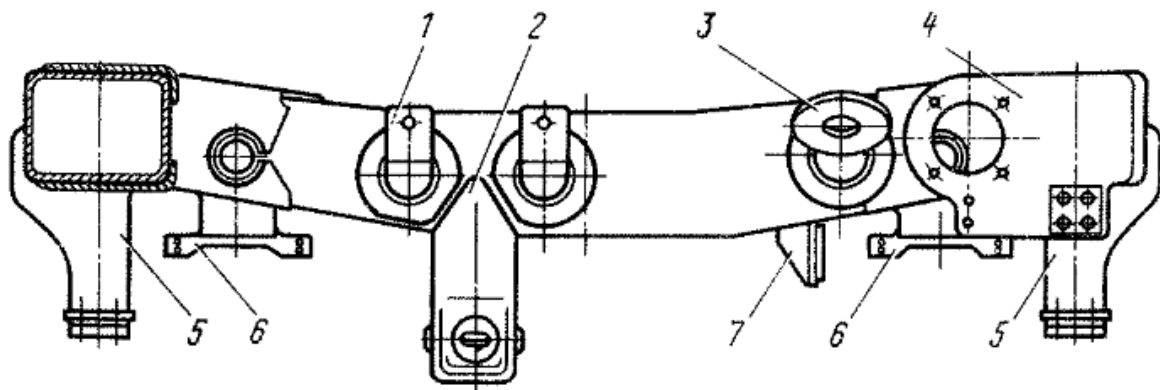


Рис. 1 – Поперечна балка рами візка вагону метрополітена: 1, 2 - верхній та нижній кронштейн підвішування двигуна, 3 – кронштейн підвішування редуктора, 4 - кронштейн кріплення гальмівного циліндру, 5 – кронштейн кріплення буксових повідців, 6 – кронштейни запобіжних скоб центрального підвішування, 7 – кронштейн вузла комплексного запобігання редуктора

Кріплення корпусу редуктора до рами візка виконано за допомогою кронштейна, модель якого зображено на рисунку 2. Корпус спирається на підшипники, які дозволяють вісі колісної пари обертатися в ньому під час руху в залежності від прогину ресор буксового підвішування. Кронштейн підвіски редуктора виготовляють із штампованої заготовки. Його вварюють циліндричною частиною в поперечну балку рами візка. Опорна частина кронштейну виконана у вигляді круглої провухини, яка має отвір по центру та нахилена під кутом 18° до горизонту. На такий же кут відхилена від вертикалі вісь підвішування, що забезпечує мінімальне вертикальне відхилення між валами двигуна та шестерні редуктора при просадці буксових ресор.

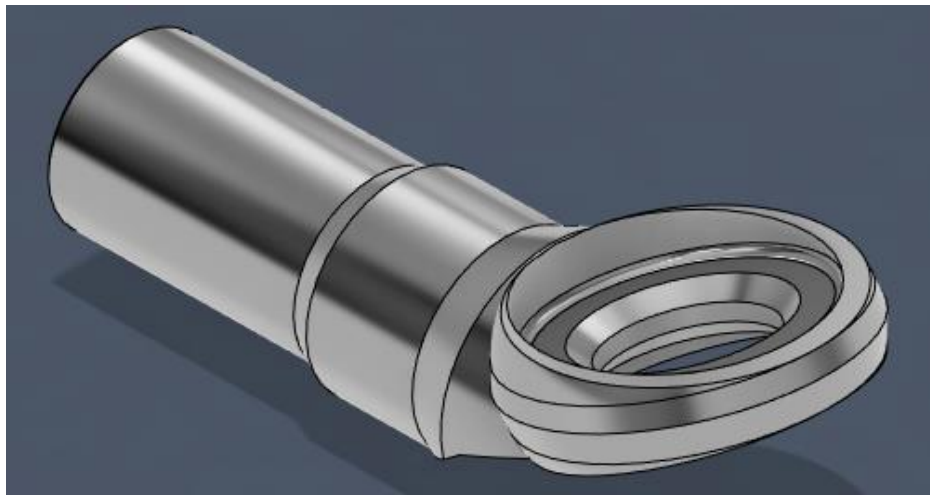


Рис. 2 – Кронштейн підвішування редуктора

До кронштейну кріпляться деталі вузла підвішування редуктора (рисунок 3): підвісний стрижень з двома гайками та двома гумо-металевими амортизаторами, штампована серга. Підвісний стрижень з'єднується з сергою за допомогою кульового підшипника ШС-40. При цьому зовнішнє кільце підшипника складає одне ціле зі стрижнем, а внутрішнє його кільце – одне ціле із сергою. Відповідно стрижень та серга можуть переміщуватися один відносно одного. В нижній точці серга з'єднується з корпусом редуктора також за допомогою підшипника – внутрішнє його кільце складає одне ціле з корпусом редуктора, а зовнішнє – одне ціле із сергою.

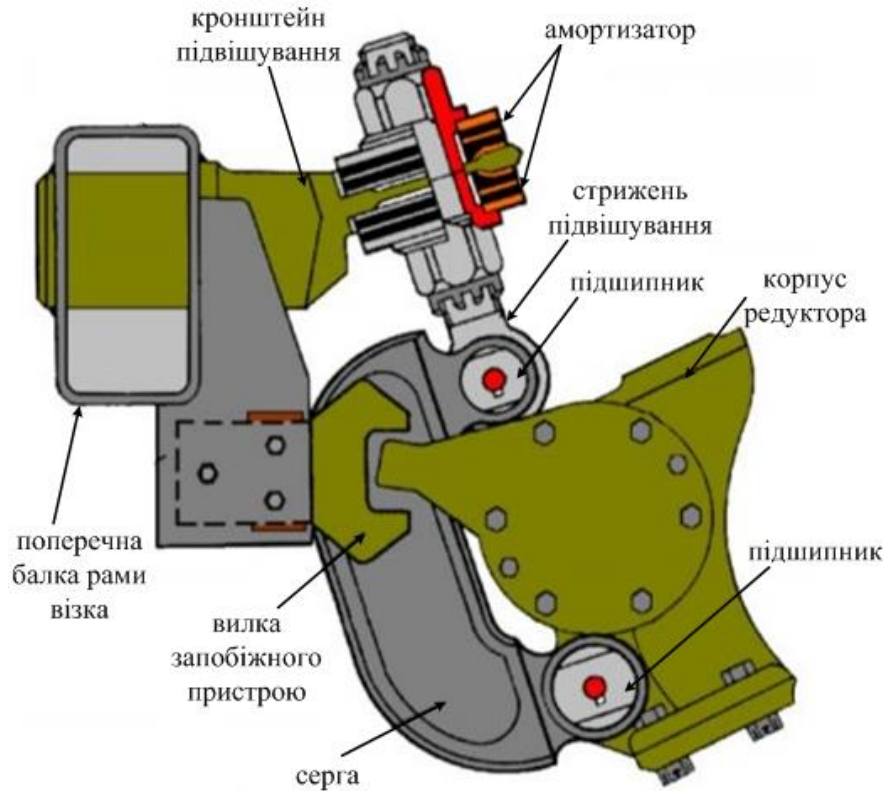


Рис. 3 – Вузол підвішування редуктора візка вагону метрополітену

Така конструкція підвіски призначена для підтримки вала шестерні редуктора на одному рівні з валом тягового двигуна, а також для пом'якшення вертикальних та бічних навантажень, що діють на підвішування редуктора та кронштейн поперечної балки під час руху по нерівностям колії. Зменшенню цих навантажень сприяють гумо-металеві амортизатори у формі шайби, які встановлені зверху та знизу провусини кронштейну підвішування редуктора.

Також для запобігання оберту корпусу редуктора до низу на рейкову колію у випадку обриву деталей підвішування або зламу кронштейну підвішування редуктора, що зварений в поперечну балку рами візка, кожен редуктор має комплексний запобіжний пристрій.

На більш сучасних візках вагонів метрополітену моделей 81-760/761 також застосовано тягову передачу II класу з опорно-осьовим підвішуванням редуктора, але сам кронштейн, що зображено на рисунку 4, та підвіска мають іншу конструкцію.

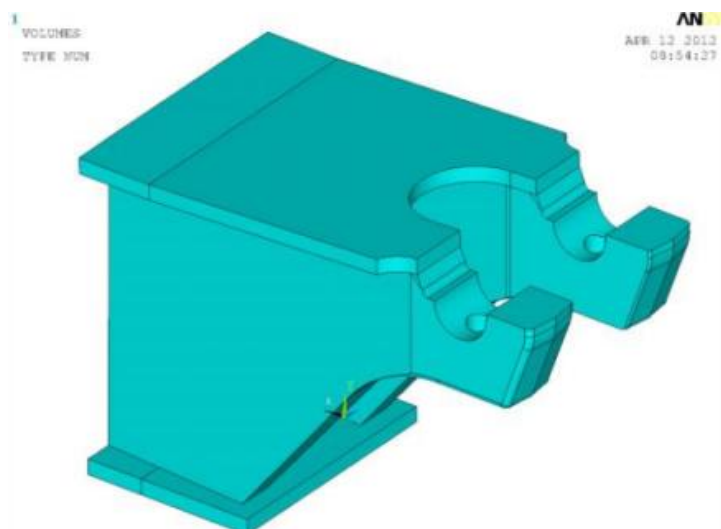


Рис. 4 – Кронштейн кріплення редуктора вагону 81-760/761

Слід зазначити, що на відміну від вагонів серії 81-717/714, де рама візка має зварно-штамповану Н-подібну конструкцію, балки якої мають коритоподібний перетин, на вагонах 81-760/761 застосовано раму листової

конструкції, яка крім поздовжніх та центральної балки також має ще дві кінцеві балки. Відповідно на рамі такої конструкції застосовано інший підхід до кріплення кронштейну підвищення редуктора - кронштейн з кованої заготовки виконано як одне ціле з фрагментом однієї вертикальної стінки центральної балки. Схема такої підвіски зображена на рисунку 5. Така конструкція знижує напруження в місцях їх концентрацій у порівнянні з попередньою схемою кріплення кронштейна на вагонах 81-717/714, коли важкий кований кронштейн приварювався до двох стінок поперечної балки візка, тим самим якби «протикаючи» її. Але така нова схема кріплення є гіршою з точки зору ремонтпридатності.

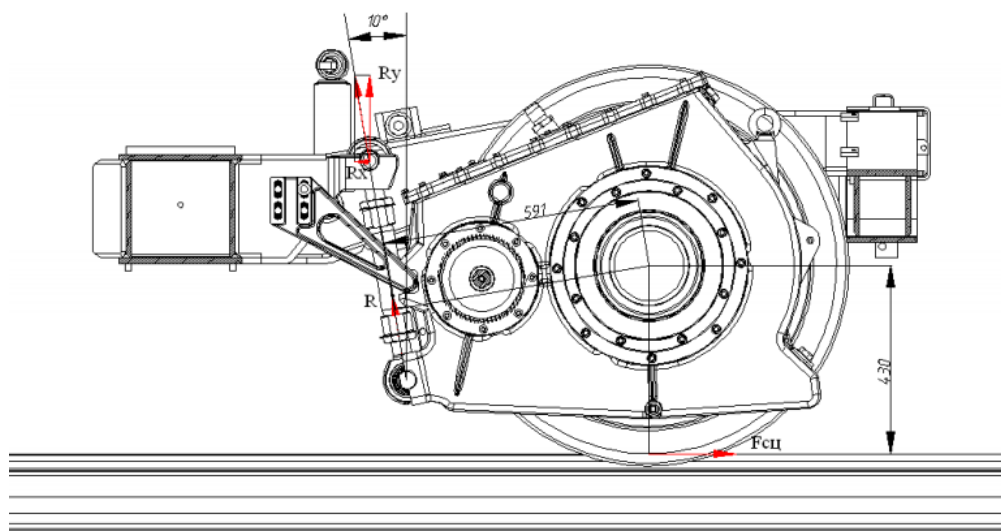


Рис. 5 – Схема підвищення редуктора вагону 81-760

Підвіска редуктора, яка зображена на рисунку 6 а, виконана у вигляді реактивної тяги та влаштована як і регульовальна тяга підвіски двигуна, що уніфікує конструкцію візка та спрощує обслуговування та ремонт. Підвіска має шарнірну конструкцію, яка кріпиться за допомогою металевого валика та болтів з гайками до кронштейну (рисунок 6 б) центральної балки та таким же чином до роз'єму на корпусі редуктора, що дозволяє регулювати співвісність валів редуктора та двигуна та висоту редуктора над рівнем головок ходових рейок.

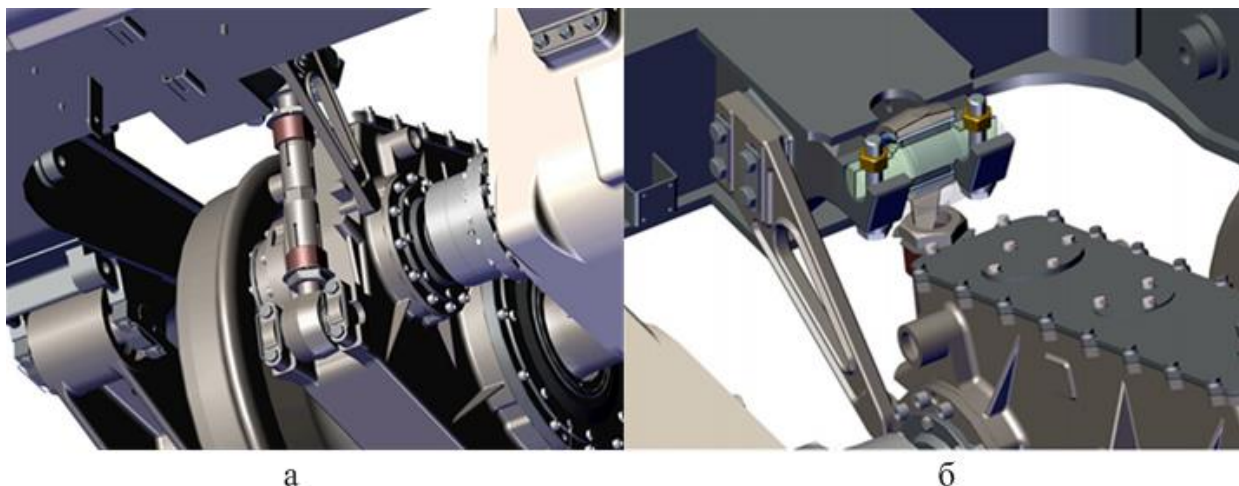


Рис. 6 – Візок вагона: а - кріплення редуктора до центральної балки; б - підвіска редуктора

У випадку несправності підвіски редуктора встановлено запобіжний пристрій у вигляді запобіжного кронштейну, який кріпиться чотирма болтами до кронштейну підвищення редуктора на центральній балці рами візка.

Також цікавою є конструкція підвищення редуктора на вагонах серії 81-740, адже на них застосовано тягову передачу III класу, тобто і тяговий двигун і редуктор мають рамне підвищення. Кріплення двигуна та редуктора до центральної поперечної балки виконано за допомогою універсального кронштейну, який зображено на рисунку 7.



Рис. 7 – Універсальний кронштейн з гумометалевими шарнірами

Кронштейн вставляється до втулки в центральній поперечній балці знизу, зверху він фіксується гайкою та стопорною пластиною. Універсальний кронштейн має два гумометалеві шарніри, до яких кріпляться з одного боку двигун, а з іншого – редуктор тягової передачі сусідньої колісної пари, як показано на схемі кріплення рисунок 8.

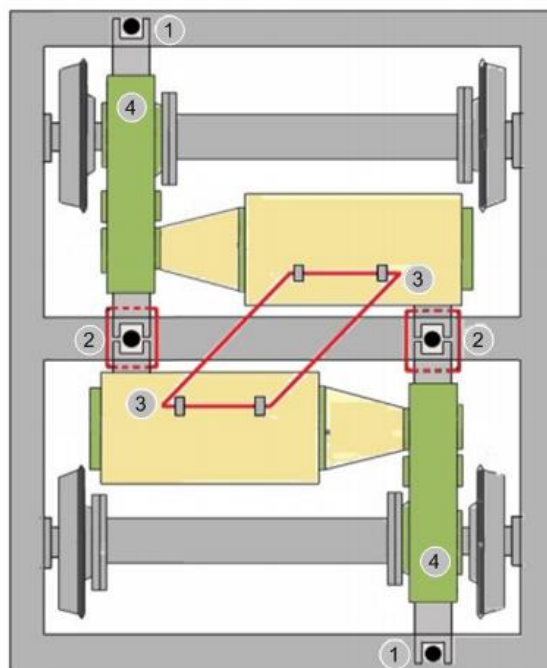


Рис. 8 – Схема кріплення тягового редуктора: 1 – кріплення через гумометалевий шарнір до кінцевої поперечної балки; 2 – універсальний кронштейн; 3 – тяговий електродвигун; 4 - редуктор

Зі сторони центральної поперечної балки корпус редуктора має кронштейн з двома приливами в торцевій частині (рисунок 9 а), аналогічний кронштейну двигуна, яким він кріпиться до універсального шарніру за допомогою болтів. Зі сторони кінцевої поперечної балки на корпусі редуктора також є кронштейн, яким він кріпиться до гумометалевого шарніру, що складається з двох однакових половин, з'єднаних регулювальною муфтою. Друга половина шарніру фіксується на приливі кінцевої поперечної балки рами візка, як показано на рисунку 9 б.

Тяговий двигун та тяговий редуктор мають запобіжні троси підвішування, які не дають впасти на рейки двигуну та редуктору у випадку несправності їх підвіски.

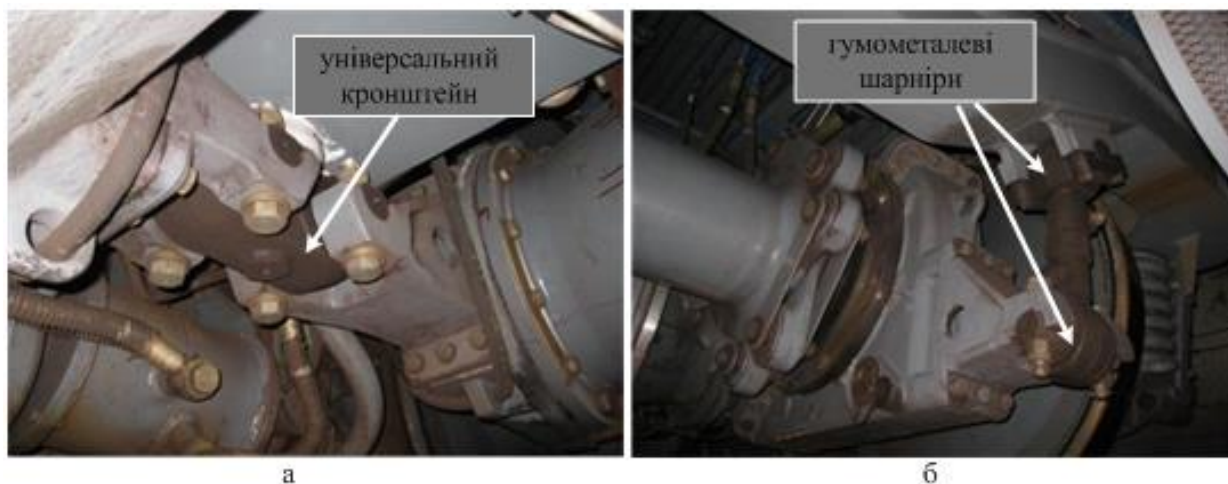


Рис. 9 – Кріплення редуктора вагона 81-740

На електропоїздах моделі CRH3A, що експлуатуються на високошвидкісних лініях в Китаї, застосовано С – подібний кронштейн кріплення редуктора до рами візка [12], модель якого зображено на рисунку 10. Даний рухомий склад працює на швидкостях 250 км/год, відповідно має підвищені вимоги до надійності ходової частини та, зокрема, тягової передачі.

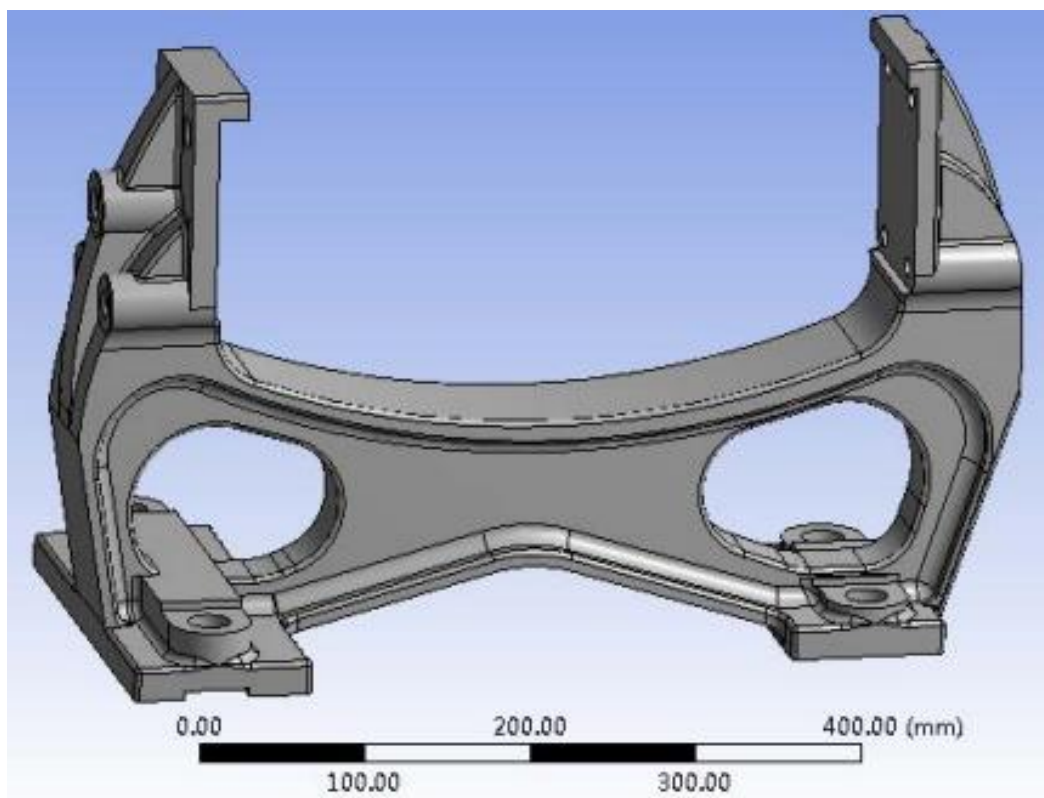


Рис. 10 – Кронштейн кріплення редуктора електропоїзда CRH3A

Кронштейн кріпиться за допомогою чотирьох болтів до спеціальної плити, що приварена до поперечної балки рами візка. З кожного боку в місці з'єднання кронштейна з редуктором знаходиться амортизаційний блок, що поглинає удари. Вертикальна жорсткість блоку становить 6,6 кН/мм, а робочий хід — 4–5 мм. Кріплення кронштейну до корпусу редуктора зображено на рисунку 11. Конструкція та дизайн кронштейну є інноваційним рішенням для з'єднання рами візка з редуктором, оскільки дозволяє зменшити вагу обладнання підвіски [13], що знижує динамічне навантаження на візок та неодмінно позитивно позначиться на енергоефективності високошвидкісного рухомого складу.

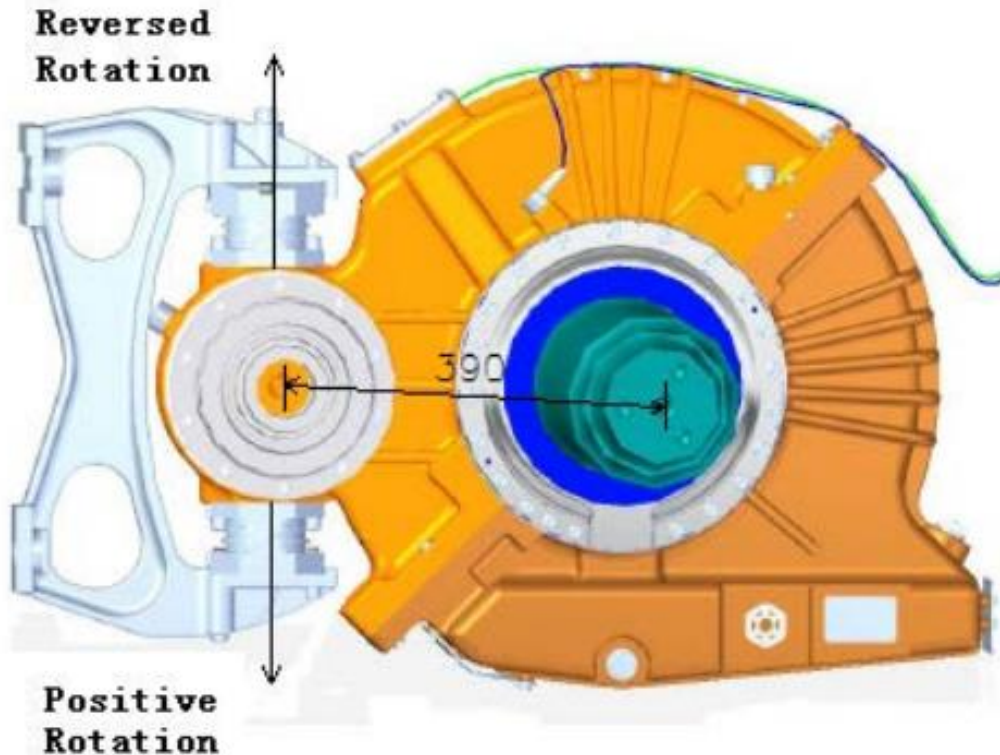


Рис. 11 – Кріплення кронштейну до корпусу редуктора

Підрозділ німецького концерну Siemens AG – компанія Siemens Mobility, спеціалізується на розробці та виробництві залізничної техніки, локомотивів, трамваїв, систем автоматизації для залізниць. Вони виробляють різноманітні рейкові транспортні засоби. Наприклад, серія локомотивів Vectron, які можуть експлуатуватися як у вантажному русі, так і в пасажирському. Розроблено версії локомотива, які працюють на постійному струмі, на змінному, багатосистемні електровози, дизельні версії, як Vectron DE та навіть дворезимний локомотив, що представляє собою комбінацію електровоза та тепловоза. Локомотиви Vectron експлуатуються на залізницях Європи та Туреччини.

Також Siemens Mobility виробляє вагони для міських транспортних систем, зокрема серія Inspiro, яка експлуатується на Варшавському, Лондонському метрополітенах та в Саудівській Аравії. Регіональні та приміські поїзди Desiro, які експлуатуються на залізницях в європейських країнах та Америці. Такі поїзди випускаються як на дизельній тязі, так і на електричній.

Високошвидкісні поїзди серії Velaro, що використовуються на лініях Іспанії та Китаю. Зокрема розглянутий вище електропоїзд CRH3A відноситься саме до серії Velaro високошвидкісних ліній Китаю.

Легкорейковий рухомий склад від Siemens Mobility – низькопідлогові трамваї серій ULF, Avanto, Combino, Avenio, які експлуатуються в містах Європи, Японії та Австралії.

В залежності від призначення транспортного засобу, конструкції його ходової частини та потужності тягового привода на рухомому складі Siemens застосовуються різні конструкції редукторів, що також впливає на дизайн та компоновку їх підвішування. Редуктори та елементи їх підвішування зображено на рисунку 12.

Відповідно на локомотивах, регіональних поїздах та електропоїздах метрополітену застосовується шарнірне підвішування редуктора, яке виконано за допомогою тяги з двома провусинами та підшипниками кочення з оптимізованою конструкцією сепаратора, а також кріпильних валиків, як зображено на рисунку 13.

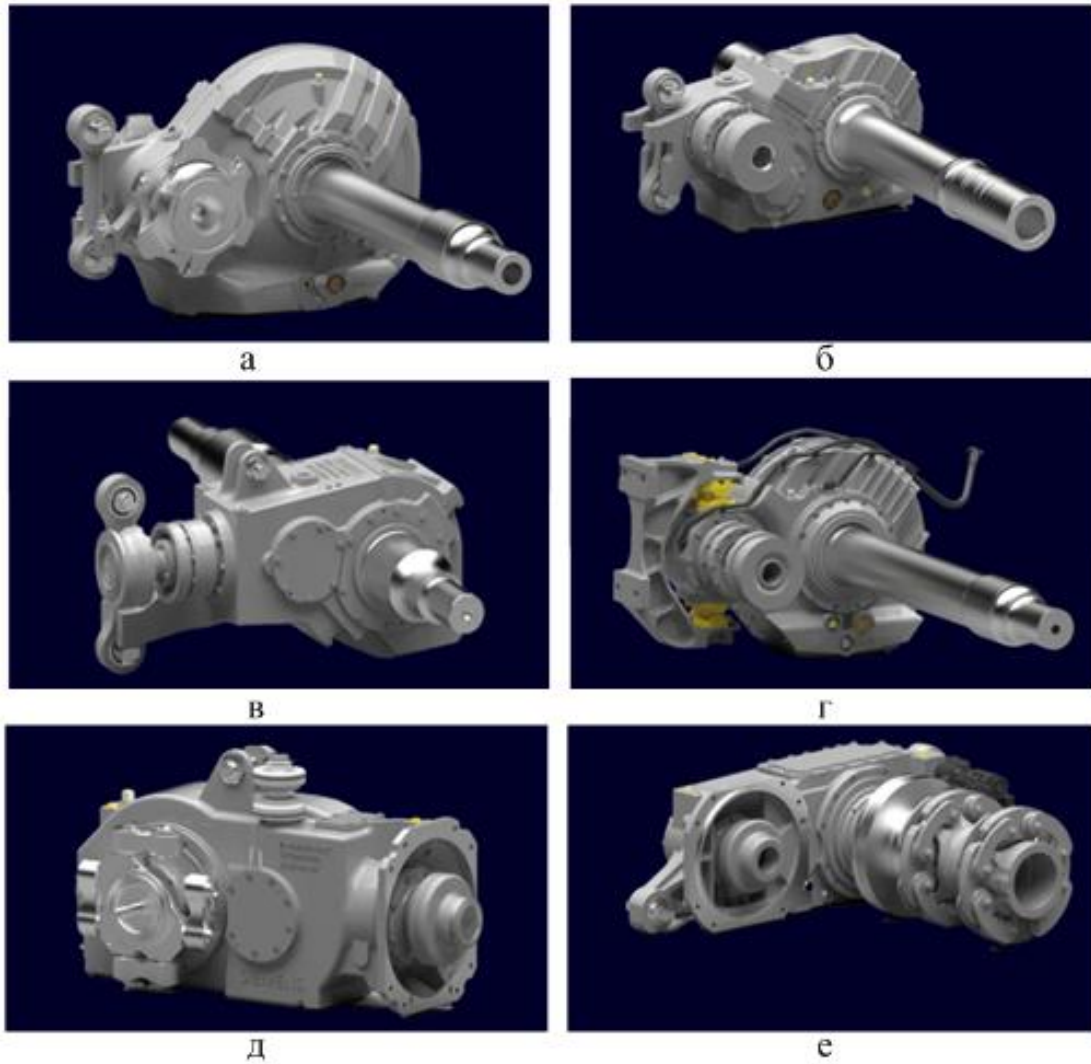


Рис. 12 – Моделі редукторів різного рухомого складу компанії Siemens Mobility: а – для локомотивів; б – для електропоїздів метрополітену та регіональних поїздів; в – конічно-циліндровий редуктор для вагонів метрополітену; г - для високошвидкісних поїздів; д – конічно-циліндровий редуктор для низькопідлогових трамваїв; е – для низькопідлогових трамваїв та електропоїздів



Рис. 13 – Елементи підвішування редуктора від Siemens Mobility

На рисунку 14 для прикладу наведено загальний вигляд візка SF 2000 від Siemens Mobility з малошумним редуктором для вагонів метро серії 4020, які експлуатуються в Австрії [14]. Як видно з рисунка, кронштейн кріплення підвіски редуктора представляє собою балку прямокутного перетину, яка приварюється до двох поперечних центральних балок рами візка, на одному кінці якої виконано кріплення редуктора, а на іншому – тягового електродвигуна сусіднього моторного блоку.

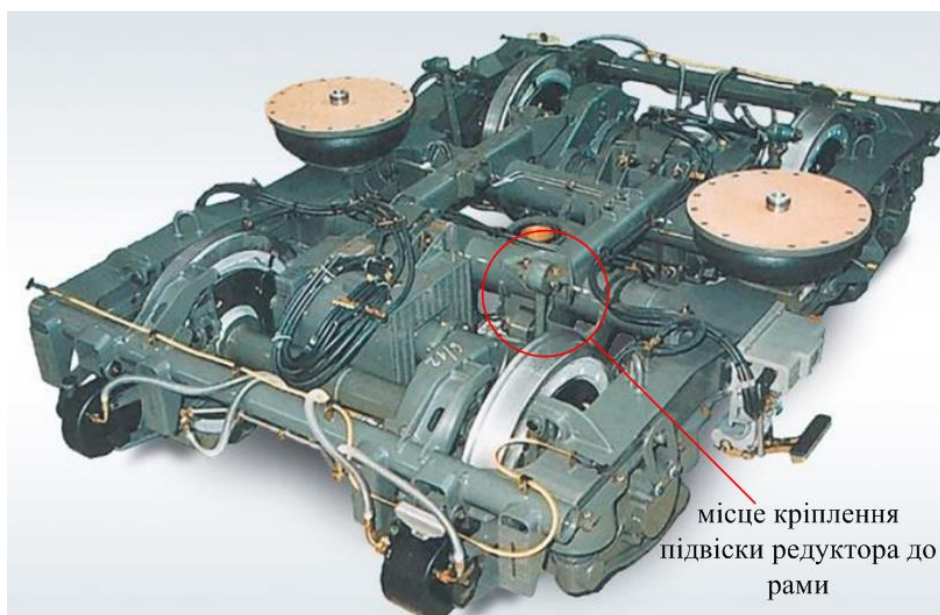
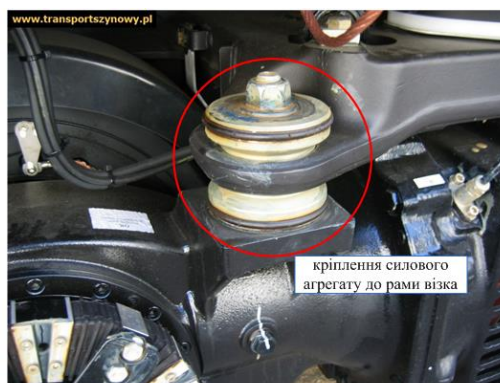


Рис. 14 – Візок SF 2000 вагона метро серії 4020

В конструкції візків [15] низькопідлогових трамваїв Combino (рисунок 15 а) застосовано компактну тягову передачу, яка розміщується по боках рами візка. Сама рама має внутрішню конструкцію, тобто площина коліс розташована назовні рами. Низька підлога салона забезпечується за рахунок використання колісних пар без традиційної осі [16]. Редуктор кріпиться до букси колеса через спеціальну вилку зчеплення, а також кріпиться на рамі візка до відливки у формі провухнини. Це кріплення виконано з використанням пружних віброізоляторів [17], як показано на рисунку 15 б.



а



б

Рис. 15 – Візок низькопідлогового трамваю Combino моделі SF30: а – загальний вигляд візка; б – кріплення редуктора до рами візка

Висновки.

1. Конструкція підвішування тягової передачі на рейкових транспортних засобах різного типу може суттєво відрізнятися одна від одної, але загальна конструкція має спільні елементи, які присутні і в підвішуванні редукторів вагонів метрополітену, і в трамваях, і на високошвидкісному транспорті. Так у всіх конструкціях присутні шарнірні деталі підвішування або пружні елементи, а також кронштейн кріплення до рами візка, яка є несучою конструкцією для тягової передачі другого та третього класу.
2. Шарнірні конструкції підвішування редуктора широко застосовуються на візках як вітчизняних, так і закордонних електропоїздів метрополітену та залізничного рухомого складу. Це актуальна технологія для

ходової частини вагонів аналогічного типу, незалежно від країни виробництва. Така конструкція дозволяє компенсувати неспіввісність валів тягового двигуна та шестерні редуктора при переміщеннях рами візка під час статичного навантаження або при русі по нерівностям колії.

3. Пружні елементи застосовуються на візках високошвидкісних поїздів, що пов'язано зі значними динамічними навантаженнями на конструкцію візка при русі на великих швидкостях. Застосування пружних амортизаторів в конструкції підвищування тягової передачі на закордонних трамваях більше зумовлено особливостями їхньої ходової частини, особливо це актуально для низькопідлогових вагонів, де жорсткі вимоги до габаритів візків, а відповідно й до тягової передачі.

4. Кріплення редуктора до рами візка виконується за допомогою кронштейнів підвищування, які мають різну конструкцію – штамповану або поєднання зварної конструкції з листового металу та штампованих елементів. Кронштейни кріплення або вварюються в тіло балки рами візка або є його складовою частиною, що більш актуально для рам листової конструкції. Самі кронштейни повинні мати найбільш оптимізовану конструкцію для зменшення напружень, що виникають при роботі тягового приводу. Оптимізація форми кронштейну є одним із шляхів забезпечення його міцності, довговічності та зменшення концентрації напружень, що в свою чергу є перспективним напрямком досліджень для поліпшення надійності тягової передачі та візка загалом.

Список літератури

1. Wang, Q., Zhou, J., Gong, D., Wang, T., Chen, J., You, T. and Zhang, Z., 2020. The Influence of the Motor Traction Vibration on Fatigue Life of the Bogie Frame of the Metro Vehicle. *Shock and Vibration*, Vol. 2020, 11 pages. doi: 10.1155/2020/7385861. (дата звернення 14.10.2025).
2. Wu, H., Wu, P., Li, F., Shi, H. and Xu, K., 2019. Fatigue analysis of the gearbox housing in high-speed trains under wheel polygonization using a multibody dynamics algorithm. *Engineering Failure Analysis*, no. 100, pp. 351-364. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.058. (дата звернення 16.10.2025).
3. Hu, W., Liu, Z., Liu, D. and Hai, X., 2016. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*, no. 73, pp. 57-71. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.008. (дата звернення 15.10.2025).
4. Liu, C., Sun, S. and Li, Q., 2025. The Impact of Gear Meshing in High-Speed EMU Gearboxes on Fatigue Strength of the Gearbox Housing. *Technologies*, no. 13 (311). doi: 10.3390/technologies13080311. (дата звернення 15.10.2025).
5. Morgado, T., Branco, C. and Infante, V., 2008. A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company, *Engineering Failure Analysis*, no. 15, pp. 154-164. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.052. (дата звернення 14.10.2025).
6. Лукашова Н. П., Павленко Т. П., Любарський Б. Г., Петренко О. М. Аналіз конструкцій ресорних підвищувачів рейкового міського електрорухомого складу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Харків, 2018. № 5 (51). С. 65-68. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.5.065. (дата звернення 16.10.2025).
7. Singh, S., Vishwakarma, A., Singh, S.R. and Racherla, V., 2023. Effect of suspension parameters on dynamics of a metro coach: A parametric study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, no. 6 (37), pp. 2741-2753. doi: 10.1007/s12206-023-0503-9. (дата звернення 15.10.2025).
8. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O. and Stichel, S., 2011. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamic*, Vol.49, no. 7, pp. 1021-1072. doi: 10.1080/00423114.2011.586430. (дата звернення 16.10.2025).
9. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
10. Гетьман Г.К., Голік С.М. Тягові передачі електрорухомого складу: Навчальний посібник. Дніпро: ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
11. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 - 717 та 81 - 714. Київ : КП «Київський метрополітен», 2005. 60 с.
12. Jianwei Yang, Minghan Yang, Xi Li and Xing Wang. Strength analysis and experiment of high speed railway gearbox bracket. *The open mechanical engineering journal*, 2015. Vol. 9. Pp. 266 – 270. DOI: 10.2174/1874155X01509010266. (дата звернення 15.10.2025).
13. Y. Chen, H.J. Zhang, Z.H. Tan, K.Z. Luo and T. Jian, "A C-shaped bracket to hold the gearbox," C.N. Patent, 201320706626.5, Nov. 2013. (дата звернення 15.10.2025).
14. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf>. (дата звернення 17.10.2025).
15. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF30. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6db6f600-1ac5-412d-8c06-9a0e85d46a84/mobility-datasheet-bogies-sf30-Plus-en.pdf>. (дата звернення 17.10.2025).
16. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyzyski, T., Krzyzkowski, A. and Stelmach, A., 2022. Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, no. 15, 4640. Doi: 10.3390/en15134640. (дата звернення 15.10.2025).
17. Maciej Górowski, 2004. Transport szynowy. Available at: [http:// www.transportszynowy.pl](http://www.transportszynowy.pl). (дата звернення 15.10.2025).

References (transliterated)

1. Wang, Q., Zhou, J., Gong, D., Wang, T., Chen, J., You, T. and Zhang, Z., 2020. The Influence of the Motor Traction Vibration on Fatigue Life of the Bogie Frame of the Metro Vehicle. *Shock and Vibration*, Vol. 2020, 11 pages. doi: 10.1155/2020/7385861. (Accessed 14.10.2025).
2. Wu, H., Wu, P., Li, F., Shi, H. and Xu, K., 2019. Fatigue analysis of the gearbox housing in high-speed trains under wheel polygonization using a multibody dynamics algorithm. *Engineering Failure Analysis*, no. 100, pp. 351-364. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.058. (Accessed 16.10.2025).
3. Hu, W., Liu, Z., Liu, D. and Hai, X., 2016. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*, no. 73, pp. 57-71. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.008. (Accessed 15.10.2025).
4. Liu, C., Sun, S. and Li, Q., 2025. The Impact of Gear Meshing in High-Speed EMU Gearboxes on Fatigue Strength of the Gearbox Housing. *Technologies*, no. 13 (311). doi: 10.3390/technologies13080311. (Accessed 15.10.2025).
5. Morgado, T., Branco, C. and Infante, V., 2008. A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company, *Engineering Failure Analysis*, no. 15, pp. 154-164. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.052. (Accessed 14.10.2025).

6. Lukashova, N., Pavlenko, T., Liubarskyi, B. and Petrenko O., 2018. Analysis of spring suspension structures of rail urban electric rolling stock [Analiz konstruktsii resornykh pidvishuvan reikovoho miskoho elektrorukhomoho skladu]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no 5 (51), pp. 65-68. doi: 10.26906/SUNZ.2018.5.065. (Accessed 16.10.2025).
7. Singh, S., Vishwakarma, A., Singh, SR. and Racherla, V., 2023. Effect of suspension parameters on dynamics of a metro coach: A parametric study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, no. 6 (37), pp. 2741-2753. doi: 10.1007/s12206-023-0503-9. (Accessed 15.10.2025).
8. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O. and Stichel, S., 2011. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamic*, Vol.49, no. 7, pp. 1021-1072. doi: 10.1080/00423114.2011.586430. (Accessed 16.10.2025).
9. Panchenko, S. V. ed., 2018. *Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu: pidruchnyk* [Design and Dynamics of Electric Rolling Stock: Textbook]. Kharkiv : UkrDUZT.
10. Hetman H.K. and Holik S.M., 2020 *Tiahovi peredachi elektrorukhomoho skladu: Navchalnyi posibnyk*. [Traction drives of electric rolling stock: Training manual] Dnipro: PF «Standart-Servis».
11. *A training manual for studying the arrangement and operation of electrical, pneumatic and mechanical equipment of metro cars of series 81 - 717 and 81 - 714*, 2005. Kyiv : KP «Kyivskiy metropoliten».
12. Jianwei Yang, Minghan Yang, Xi Li and Xing Wang. Strength analysis and experiment of high speed railway gearbox bracket. *The open mechanical engineering journal*, 2015. Vol. 9. Pp. 266 – 270. DOI: 10.2174/1874155X01509010266. (Accessed 15.10.2025).
13. Y. Chen, H.J. Zhang, Z.H. Tan, K.Z. Luo and T. Jian, “A C-shaped bracket to hold the gearbox,” C.N. Patent, 201320706626.5, Nov. 2013. (Accessed 15.10.2025).
14. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf>. (Accessed 17.10.2025).
15. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF30. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6db6f600-1ac5-412d-8c06-9a0e85d46a84/mobility-datasheet-bogies-sf30-Plus-en.pdf>. (Accessed 17.10.2025).
16. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyzyski, T., Krzyzyskowski, A. and Stelmach, A., 2022. Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, no. 15, 4640. Doi: 10.3390/en15134640. (Accessed 15.10.2025).
17. Maciej Górowski, 2004. Transport szynowy. Available at: [http:// www.transportszynowy.pl](http://www.transportszynowy.pl). (Accessed 15.10.2025).

Надійшла (received) 06.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бірюков Сергій Віталійович (Biriukov Serhii) - аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6403-5880>; mob.: 0976543478; e-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Губський Сергій Олександрович (Hubskey Serhii) - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, м. Харків; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; mob.: 0662192050; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Ілленко Костянтин Валерійович (Illienko Kostiantyn) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5124-0862>; mob.: +380 99 382 93 80; e-mail: illenko_phd@kart.edu.ua.

Горбач Сергій Дмитрович (Horbach Serhii) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2945-3342>; mob.: +380 93 607 68 44; e-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Говорун Владислав Вадимович (Hovorun Vladyslav) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4323-7466>; mob.: +380 67 158 37 56; e-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.com.

Д. В. ЧЕРКАШИН, О. Ф САЄНКО, А. В. ЯВТУШЕНКО, Ю. В. БАБАЙ, С. О. ГУБСЬКИЙ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ТА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

У статті розглянуто застосування методів обробки вібраційних сигналів для діагностики технічного стану роторних систем. Проведено порівняльний аналіз швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), безперервного (БВП) та дискретного (ДВП) вейвлет-перетворення з метою виявлення аномалій та імпульсних збурень. ШПФ дозволяє оцінити спектральний склад сигналу, однак не дає інформації про час появи частот. На відміну від нього, БВП та ДВП забезпечують часо-частотну локалізацію та виявлення прихованих дефектів, що є ключовим для нестационарних процесів. Отримані результати з експериментального стенда RK-4 підтверджують ефективність вейвлет-аналізу при високошвидкісному обертанні ротора та моделюванні дефектів, таких як дисбаланс, тріщина чи тертя. Запропоноване поєднання методів дозволяє покращити точність діагностики та реалізувати ефективний моніторинг стану обладнання.

Ключові слова: вібраційна діагностика, швидке перетворення Фур'є, безперервне вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення, аналіз сигналів, роторна система, дисбаланс, нестационарний процес.

D. CHERKASHYN, O. SAIENKO, A. YAVTUSHENKO, Y. BABAI, S. HUBSKYI

COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATIONS USING FAST FOURIER TRANSFORM AND WAVELET TRANSFORM

The article examines the application of vibration signal processing methods for diagnosing the technical condition of rotor systems. A comparative analysis of the Fast Fourier Transform (FFT), Continuous Wavelet Transform (CWT), and Discrete Wavelet Transform (DWT) was conducted to detect anomalies and impulsive disturbances. FFT enables the evaluation of the spectral content of a signal but lacks time localization of frequency components. In contrast, CWT and DWT provide time-frequency localization and allow the identification of hidden defects, which is crucial for analyzing non-stationary processes. Experimental results obtained from the RK-4 test bench confirm the effectiveness of wavelet analysis for high-speed rotor operation and modeling of faults such as imbalance, cracks, or friction. The proposed combination of methods improves diagnostic accuracy and enables efficient condition monitoring of equipment.

Keywords: vibration diagnostics, fast Fourier transform, continuous wavelet transform, discrete wavelet transform, signal analysis, rotary system, imbalance, non-stationary process.

Вступ.

Вібраційна діагностика є одним із найефективніших методів технічного контролю стану обертового обладнання [1, 2]. Вона дозволяє виявляти дефекти ще на ранніх стадіях їх розвитку шляхом аналізу сигналів, отриманих із вібраційних сенсорів [3]. У сучасних умовах особливого значення набуває застосування математичних методів обробки сигналів, зокрема перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень, які дають змогу точно визначити характер, локалізацію й причину аномалій у роботі машин і механізмів.

Мета та постановка задачі.

Метою даної роботи є порівняльний аналіз ефективності ШПФ та вейвлет-перетворень (безперервного та дискретного) для обробки вібраційних сигналів у задачах технічної діагностики. Особливу увагу приділено здатності кожного методу виявляти ознаки несправностей у нестационарних режимах роботи обладнання.

ШПФ широко використовується для спектрального аналізу сигналів і дозволяє виявляти частотні компоненти. Однак його обмеження полягає у відсутності часової локалізації, що знижує ефективність при аналізі короткочасних або імпульсних збурень. Натомість вейвлет-перетворення забезпечують часо-частотну деталізацію сигналу, що дає змогу ідентифікувати момент появи аномалій.

Задачею є дослідити та порівняти ефективність зазначених методів при аналізі вібрацій, отриманих у лабораторних умовах із роторної установки з моделюванням дефектів. У рамках роботи буде побудовано спектри Фур'є та скейлограми вейвлет-перетворень, визначено їх інформативність та надано рекомендації щодо вибору методу залежно від типу сигналу [4].

Аналіз та перетворення Фур'є.

Загальна характеристика перетворення Фур'є. Аналіз Фур'є є одним із найважливіших інструментів у сучасній вібраційній діагностиці. Його основна ідея полягає у представленні складного сигналу (наприклад, вібраційного сигналу з датчика) у вигляді суми гармонічних (синусоїдальних) коливань різних частот, амплітуд і фаз.

Цей метод дозволяє визначити, які частоти присутні у сигналі, та оцінити їхню інтенсивність [5]. Частотний спектр сигналу, отриманий за допомогою перетворення Фур'є, широко використовується для виявлення технічних несправностей [6], таких як:

- дисбаланс обертових деталей;
- розцентрування валів;
- тріщини або надломи;
- нерівномірне тертя в підшипниках тощо.

Основне рівняння швидкого перетворення Фур'є. ШПФ – це алгоритм, що ефективно обчислює дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Він дозволяє перетворити сигнал із часової області в частотну [7].

Основне рівняння ДПФ виглядає так:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

де X_k – спектральна складова сигналу на частоті k ;
 x_n – вхідний сигнал у часовій області (відліки сигналу);
 N – загальна кількість відліків сигналу;
 j – уявна одиниця ($j^2 = -1$);
 $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ – комплексна експонента, що описує гармоніки.

ШПФ – це ефективна реалізація ДПФ, яка має обчислювальну складність $O(N \log N)$ замість $O(N^2)$, тому використовується у більшості програм та мікроконтролерів для аналізу вібрацій [8, 9].

Побудова графіка спектру Фур'є. Для візуального аналізу частотного спектру вібраційного сигналу було використано ШПФ, яке дозволяє перетворити сигнал із часової області в частотну. Це дає змогу виявити домінуючі частоти, що мають найбільший вклад у коливання [10, 11]. Аналіз було здійснено в середовищі Python із використанням бібліотек *matplotlib*, *numpy* та *scipy*.

На графіку спектру (рис. 1) зображено амплітудно-частотну характеристику сигналу, отриманого з вібраційного сенсора. По осі абсцис відкладено частоти (Гц), а по осі ординат – амплітуди відповідних частотних складових. Такий аналіз дає змогу визначити, які частоти присутні у сигналі та з якою інтенсивністю.

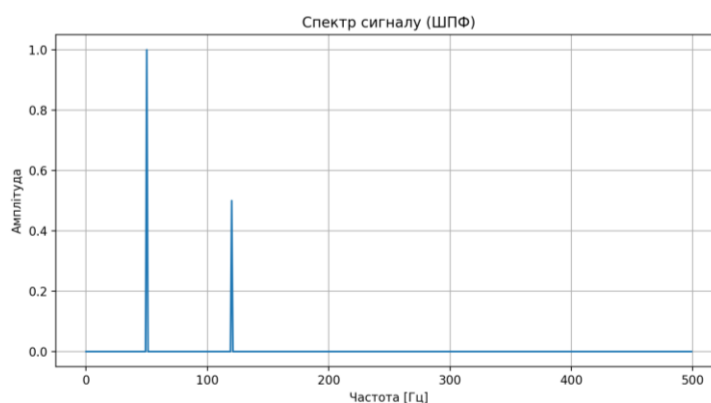


Рис. 1 – Спектр сигналу після застосування ШПФ

Незважаючи на ефективність ШПФ для аналізу стаціонарних сигналів, цей метод має обмеження: він не дозволяє визначити, коли саме у часі з'являються ті чи інші частоти. Тобто, ШПФ не підходить для аналізу нестационарних або перехідних процесів, де характеристики сигналу змінюються з часом. Для таких випадків доцільним є використання вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення є сучасним методом аналізу сигналів, який дозволяє одночасно досліджувати як частотний, так і часовий спектр сигналу [12]. На відміну від класичного перетворення Фур'є, яке надає лише інформацію про частотний склад сигналу без урахування часу, вейвлет-перетворення дає змогу визначити, які саме частоти присутні у сигналі та в який момент часу вони з'являються або зникають [13, 14].

Суть методу. Основна ідея полягає в розкладанні сигналу на короткі хвильові функції, які називаються вейвлетами. Ці функції мають обмежену тривалість (на відміну від синусоїд, які використовуються у ШПФ) і можуть змінювати масштаб (тобто "розтягуватися" або "стискатися") та зсув у часі. Завдяки цим властивостям вейвлети можуть бути адаптовані до локальних особливостей сигналу [15].

Переваги вейвлет-перетворення:

- **Аналіз нестационарних сигналів.** дозволяє ефективно досліджувати сигнали, частотні характеристики яких змінюються з часом;
- **Часо-частотна локалізація.** дає змогу точно визначити, коли саме у сигналі виникають певні частотні компоненти;
- **Гнучкість вибору вейвлет-функції.** можна підібрати тип вейвлета залежно від характеру сигналу – наприклад, Daubechies, Morlet, Хаг тощо;
- **Масштабована роздільна здатність.** високочастотні компоненти аналізуються з високою часовою точністю, а низькочастотні – з високою частотною роздільністю.

Типи вейвлет-перетворення. Існують два основні підходи:

- **Безперервне вейвлет-перетворення** – це метод, при якому сигнал аналізується за допомогою безперервного масштабування та зсуву вейвлет-функції. Результатом перетворення є двовимірний скейлограм, яка відображає інтенсивність сигналу як функцію часу та частоти [16].

Математично БВП визначається так:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

де $x(t)$ – вхідний сигнал;

$\psi(t)$ – обрана материнська вейвлет-функція;

a – масштаб (обернено пропорційний частоті);

b – часовий зсув;

* – комплексне спряження.

БВП дозволяє детально вивчати локальні особливості сигналу, такі як імпульси, короточасні коливання чи перехідні процеси, завдяки зміні масштабу (розтягування або стискання) та часовому зсуву вейвлета.

На рис. 2 наведено приклад скейлограмми сигналу, отриманого в результаті застосування БВП. На відміну від спектра Фур'є (див. рис. 1), скейлограмма дозволяє чітко визначити момент часу виникнення тієї чи іншої частотної компоненти, що забезпечує більш глибокий аналіз нестационарних процесів [17, 18].

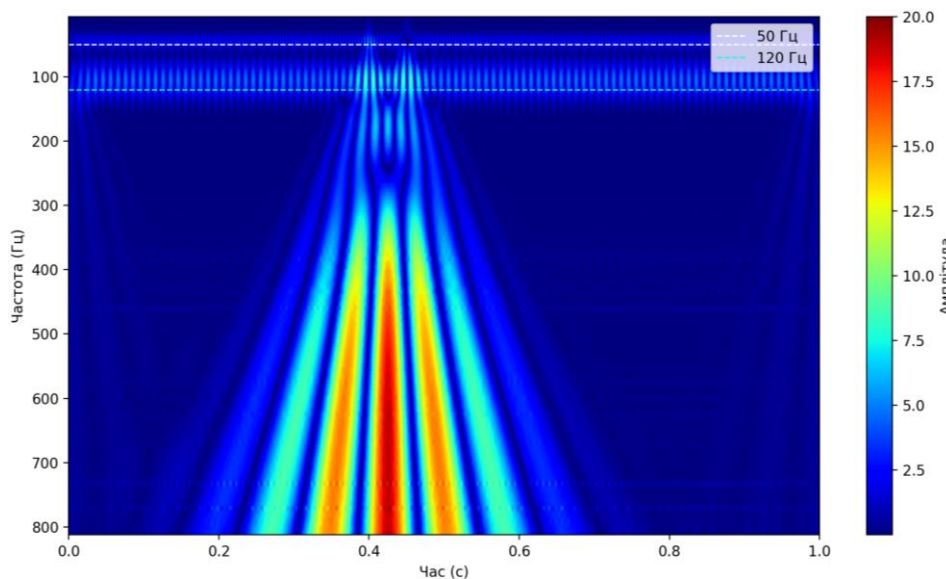


Рис. 2 – Часо-частотна карта сигналу, отримана за допомогою БВП

Зображено часо-частотну карту сигналу, отриману із застосуванням вейвлета Морле. Даний метод забезпечує високу точність локалізації частотних характеристик у часовій області, що є особливо ефективним при аналізі імпульсних або швидкоплинних збурень у системі.

Горизонтальна вісь графіка відображає час у секундах у межах від 0,0 до 1,0 с, а вертикальна – частоту в герцах у діапазоні від 0 до 800 Гц. Таким чином, забезпечується можливість детального відстеження зміни спектрального складу сигналу протягом усього часу спостереження.

Колірна шкала відображає амплітуду вейвлет-коефіцієнтів: синій колір відповідає низьким значенням, тоді як червоний позначає максимальні амплітуди, що вказують на найінтенсивніші коливання у певні часові інтервали. Завдяки цьому візуально ідентифікуються періоди підвищеної енергії сигналу.

Аналіз отриманої вейвлет-карти демонструє наявність інтенсивного збурення в часовому інтервалі приблизно 0,4 – 0,5 с. Ця ділянка характеризується підвищеною амплітудою в широкому спектрі частот, що вказує на короточасну імпульсну подію, ймовірно спричинену механічним ударом або переходом системи в нестійкий режим роботи.

На графіку додатково позначено горизонтальними пунктирними лініями частоти 50 Гц і 120 Гц. Частота 50 Гц, ймовірно, пов'язана з впливом мережевого живлення, а 120 Гц може вказувати на другу гармоніку або бути ознакою резонансного явища, спричиненого механічними дефектами чи електромагнітними збуреннями.

Отримані результати підтверджують ефективність використання БВП для виявлення аномальних імпульсів у вібраційному сигналі. Такий підхід дозволяє не лише ідентифікувати сам факт збурення, а й точно визначити час його виникнення та спектральний склад, що є ключовим аспектом у побудові систем технічної діагностики обладнання за вібраційними характеристиками.

• Дискретне вейвлет-перетворення – застосовується для обробки сигналів, компресії, фільтрації та виявлення аномалій [19]. Працює з обмеженою кількістю масштабів і забезпечує компактне представлення сигналу [20].

Пояснення термінів. Деталізація (D_n) – частина сигналу, що містить інформацію про зміни на певному частотному рівні. Чим нижчий номер D , тим вищі частоти вона охоплює.

Апроксимація (A_n) – «гладка» частина сигналу, яка зберігає його основну форму без дрібних змін.

Імпульс або аномалія – проявляється у вигляді різкого піку на певному рівні деталізації; може свідчити про дефект, удар або несподівану подію.

На рис. 3 наведено приклад ДВП тестового сигналу. Для перетворення використано вейвлет Daubechies четвертого порядку (db4) з рівнем декомпозиції 4. Такий аналіз дає змогу розкласти сигнал на компоненти з різним частотним вмістом, що дозволяє виявляти як повільні тренди, так і короткочасні аномальні коливання [21].

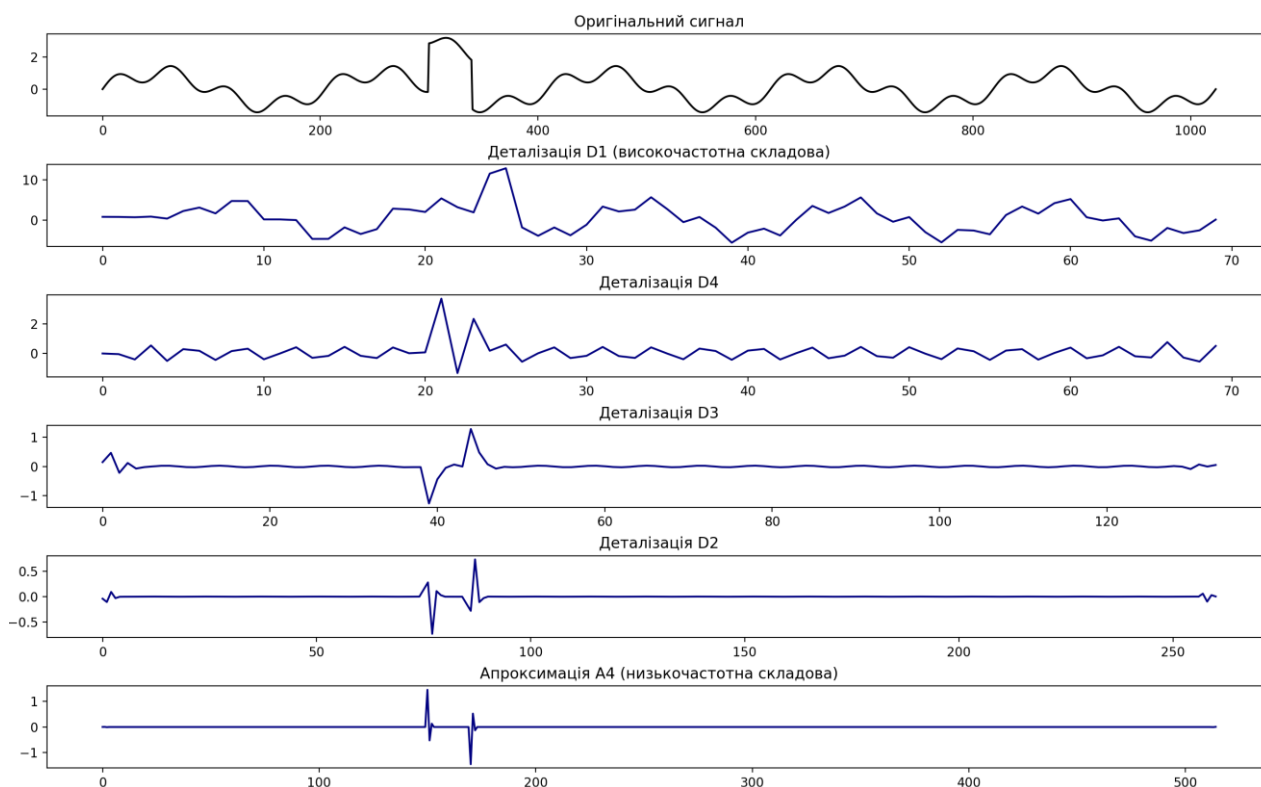


Рис 3. – Дискретне вейвлет-перетворення сигналу (db4, рівень 4): оригінальний сигнал, рівні деталізації D1–D4 та апроксимація A4.

Графік дискретного вейвлет-перетворення відображає декілька рівнів представлення сигналу [22].

Перший – це оригінальний сигнал, поданий на верхньому графіку. Він демонструє повну форму вхідного сигналу, в якій добре помітні як періодичні складові, так і короткочасний імпульс, що може свідчити про аномалію, таку як механічний удар або раптове збурення в системі.

Нижче подані рівні деталізації: D1, D2, D3 та D4. Вони характеризують високочастотні компоненти сигналу, що дозволяє проаналізувати його структуру з різною частотною роздільною здатністю.

Найнижчий із них, тобто D1, відповідає найвищим частотам і містить найдрібніші флуктуації та шум.

Рівні D2–D4 охоплюють середньочастотний діапазон, на якому зазвичай краще видно характерні імпульсні чи аномальні події. Особливої уваги заслуговує той рівень, де така подія візуалізується найчіткіше – саме там спостерігається різке зростання або зміна сигналу.

Останній рівень, апроксимація A4, відображає низькочастотну складову сигналу, яка формує загальний тренд. У цій частині добре помітні повільні зміни сигналу, усереднені відповідно до масштабів, що дає змогу оцінити його довгострокову динаміку.

Отже, метод ДВП дає змогу ефективно локалізувати аномальні ділянки сигналу як у часовій, так і в частотній площині. На відміну від класичних методів спектрального аналізу, вейвлет-декомпозиція забезпечує багаторівневе представлення сигналу, що є особливо цінним при обробці нестационарних процесів. Таке представлення є компактним і придатним для подальшої обробки – зокрема, фільтрації, стиснення або автоматичного виявлення аномалій.

Перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення в аналізі вібрацій.

У процесі аналізу вібраційних сигналів для виявлення аномалій і характерних змін важливо обрати відповідний метод перетворення [23]. На рис. 1–3 наведено приклади результатів, отриманих за допомогою трьох підходів: ШПФ, БВП та ДВП.

Рис. 1 демонструє спектр сигналу, отриманий за допомогою ШПФ. Цей метод забезпечує представлення сигналу у частотній області, однак не містить інформації про час появи тих чи інших частот. Тобто, аналіз надає середньозважену характеристику спектру за весь інтервал спостереження. Такий підхід є обмеженим у випадках, коли необхідно дослідити нестационарні або імпульсні події.

Рис. 2 подає часо-частотну карту, побудовану на основі БВП з використанням вейвлета Морле. На відміну від ШПФ, цей метод дозволяє зберігати інформацію як про частоту, так і про час, забезпечуючи локалізацію змін у сигналі. Яскраві кольори вказують на високі амплітуди (енергію) коливань у певний момент часу. Такий підхід є надзвичайно ефективним для виявлення короткочасних імпульсів, що можуть свідчити про дефекти або збурення у системі.

Рис. 3 ілюструє дискретне вейвлет-перетворення сигналу, виконане з використанням вейвлета Daubechies (db4) до четвертого рівня декомпозиції. На графіку представлено оригінальний сигнал, компоненти деталізації (D1–D4) та апроксимацію A4. ДВП розкладає сигнал на частотні діапазони з різною роздільною здатністю та дозволяє виявляти аномалії на різних масштабах. Зокрема, можна визначити, на якому рівні найкраще локалізується

імпульс – це дає змогу точно ідентифікувати частотний діапазон та часову локалізацію події.

Таблиця 1 – Порівняння перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень (БВП/ДВП) для аналізу вібраційних сигналів

Критерій	Перетворення Фур'є	Вейвлет-перетворення (БВП/ДВП)
Подання у частотній області	Так	Так
Локалізація у часі	Немає	Є
Підходить для стаціонарних сигналів	Так	Так
Підходить для нестационарних сигналів	Ні	Так
Застосування для імпульсів, збурень	Обмежене	Ефективне
Формат представлення	Глобальна спектральна характеристика	Багаторівнева (деталізація й апроксимація)

Таким чином, вибір методу залежить від конкретної задачі: для діагностики нестационарних або імпульсних явищ доцільно застосовувати вейвлет-перетворення, а для оцінки загального спектрального складу – класичне ШПФ (табл.1).

Експериментальна установка та збір вібраційних сигналів.

Для дослідження вібраційних сигналів та перевірки ефективності методу БВП, було проведено серію експериментів на лабораторному стенді Bently Nevada RK-4 Rotor Kit. Експерименти охоплювали як справний, так і несправний стан ротора, з моделюванням різних типів дефектів при змінних швидкостях обертання [24].

На рис. 4(а) подано загальний вигляд експериментального стенда та системи збору сигналів. Установка складається з гнучкого сталевого вала, з'єданого з електродвигуном із регульованою швидкістю обертання. Вал підтримується двома роликowymi підшипниками, які закріплені у сталевих опорах (позначених як а і б на рис. 4(б)). У середній частині вала закріплений один жорсткий диск діаметром 75 мм, товщиною 25 мм та масою 0,845 кг.

Щоб дослідити вплив дефектів на вібраційну поведінку системи, у конструкції було реалізовано декілька типів несправностей:

- Імітація дисбалансу здійснювалася шляхом додавання додаткової маси (0,018 кг) з ексцентриситетом 10 мм, закріпленої на диску.
- Тріщина у валі імітувалася за допомогою двох взаємно перпендикулярних радіальних пружин, що відтворюють динаміку так званої «дихаючої» тріщини.
- Тертя типу «rub-impact» реалізоване в точці, позначеній на рис. 4(б) цифрою 11, шляхом встановлення маленького гвинта на контрольованій відстані від поверхні ротора. При обертанні відбувалися періодичні легкі контакти ротора з гвинтом, що дозволяло моделювати локальні збурення або удари.

Усі експерименти проводились при обертанні ротора в одному напрямку, щоб уникнути зворотного впливу сил тертя. Швидкість обертання контролювалася за допомогою лазерного тахометра і змінювалася в межах від 900 до 4500 об/хв.

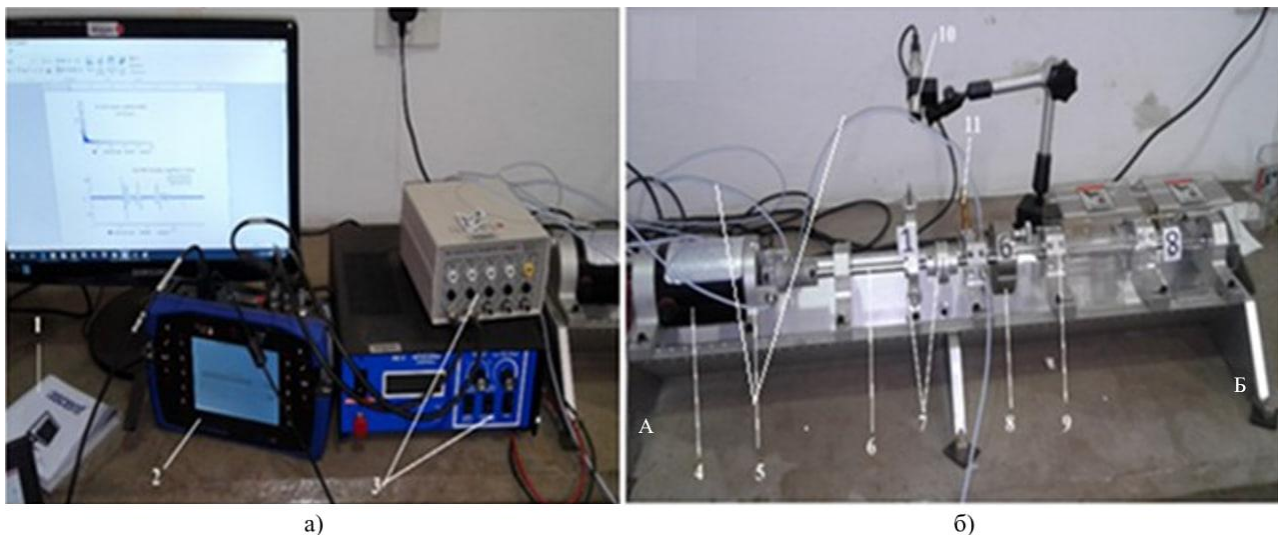


Рис. 4 – Загальний вигляд експериментальної установки RK-4: 1 – підсилювач Ascent; 2 – система аналізу Scout 100; 3 – інтерфейс збору даних; 4 – електродвигун; 5 – датчики наближення; 6 – вал; 7 – симулятор тріщини; 8 – диск; 9 – опора вала; 10 – лазерний тахометр; 11 – гвинт для імітації тертя ("rub-contact").

Збір вібраційних сигналів здійснювався за допомогою чотирьох бездотикових датчиків наближення, які були встановлені на фіксованій відстані від вала. Датчики орієнтовані у двох взаємно перпендикулярних площинах, що дозволяло фіксувати радіальні коливання ротора у вертикальному та горизонтальному напрямках. Усі вихідні сигнали підсилювалися за допомогою підсилювача Ascent та надходили до комп'ютера через інтерфейс збору даних, керований за допомогою Matlab Toolbox.

Для реєстрації даних використовувалося вимірювальне обладнання Commtest (версія 11.6.0), у поєднанні з програмним забезпеченням Ascent 2013, а також утилітами Scout 100 та Vibration Assistant, що забезпечували обробку, візуалізацію та попередній аналіз сигналів.

Отримані вібраційні сигнали аналізувалися як у частотній області за допомогою ШПФ, так і в часо-частотній області за допомогою БВП.

Аналіз вібраційної реакції роторної системи при дисбалансі та осьовому зусиллі.

У першій серії експериментів було досліджено торсійну деформацію вала шляхом зміни крутного моменту електродвигуна. Подальший спільний аналіз частотного спектра, траєкторії ротора, орбітальних діаграм та БВП дозволив ідентифікувати особливості прояву дисбалансу на основі експериментальних вібраційних сигналів. Роторна система з дисбалансом була протестована на високих обертах до 10 000 об/хв шляхом ручного регулювання швидкості електродвигуна (рис. 4).

На рис. 5 представлено реакцію системи у випадку дисбалансу за відсутності тріщини або тертя. З аналізу орбітальної діаграми (рис. 5б) видно, що проходження критичної швидкості супроводжується характерною деформацією траєкторії ротора – формується замкнене орбітальне кільце. На початковій стадії обертання амплітуда зростає до максимуму $R_1 = 23,3$ мм (у резонансі), після чого стабілізується до регулярної кругової траєкторії. Мінімальна амплітуда орбіти становить $R_2 = 2,3 \times 10^{-6}$ м, що відповідає першій критичній швидкості $\omega = 1132,27$ об/хв (рис. 5а). Частотний спектр, побудований за ШПФ (рис. 5в), показує виражену гармоніку першого порядку (1X) з максимумом при 23,46 Гц, що підтверджує домінування дисбалансу у динамічній відповіді системи.

Для глибшого аналізу були проведені додаткові експерименти при низькій (1150 об/хв) та високій (2570 об/хв) швидкостях з використанням БВП. Аналіз сигналів дозволив виявити приховані особливості, які були невидимі в спектрі Фур'є. У дослідженнях було використано вейвлети Daubechies і Morlet, які виявилися ефективними для діагностики дисбалансу.

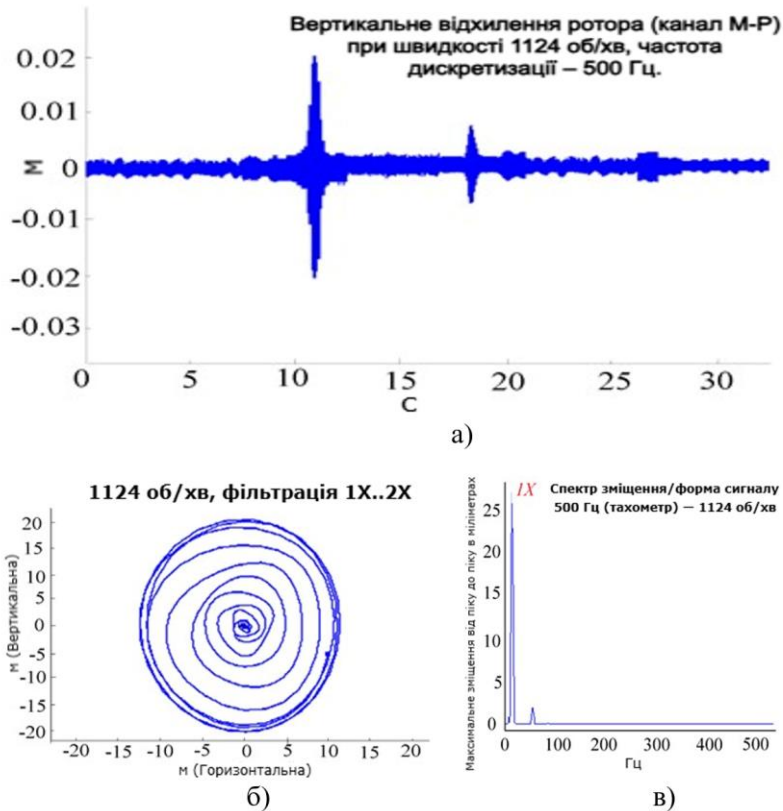


Рис. 5 – Реакція роторної системи з дисбалансом під час розгону при 1124 об/хв: а) бічне зміщення вала; б) орбітальна траєкторія ротора при дисбалансі; в) експериментальний спектр ШПФ

На рис. 6 зображено двовимірну (6а) та тривимірну (6б) скейлограми БВП для дисбалансованої системи при швидкості 1124 об/хв. Обидва графіки є переважно згладженими, за винятком окремої ділянки поблизу $t = 3400$ с, де відбувається резонанс, спричинений ексцентричною масою. Особливо помітна зона високої енергії (червоний колір) на 3D-скейлограмі (рис. 6б), яка свідчить про збудження системи при першій резонансній частоті.

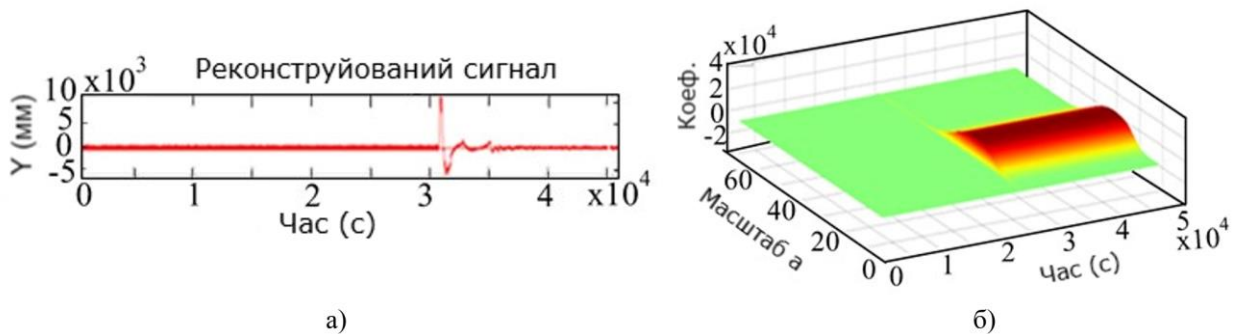


Рис. 6 – 2D та 3D скейлограми реакції незбалансованого ротора РК-4 (1124 об/хв), отримані методом безперервного вейвлет-перетворення: а) поперечне зміщення, б) тривимірна БВП -скейлограмма

На рис. 7 показано аналогічні скейлограми для більшої швидкості ротора 2570 об/хв. Порівняно з попереднім випадком, БВП -аналіз виявляє більше частотних компонент, зокрема у діапазоні 80–237 Гц, де формується щільна червона зона (рис. 7б). Ця область відповідає кільком локальним резонансним пікам, які були повністю невидимі у спектрі ШПФ (рис. 5в). Це свідчить про приховані моди коливань і нелінійні ефекти, зумовлені дисбалансом. Особливо чутливо БВП реагує на зростання швидкості обертання, фіксуючи значні енергетичні збурення в системі.

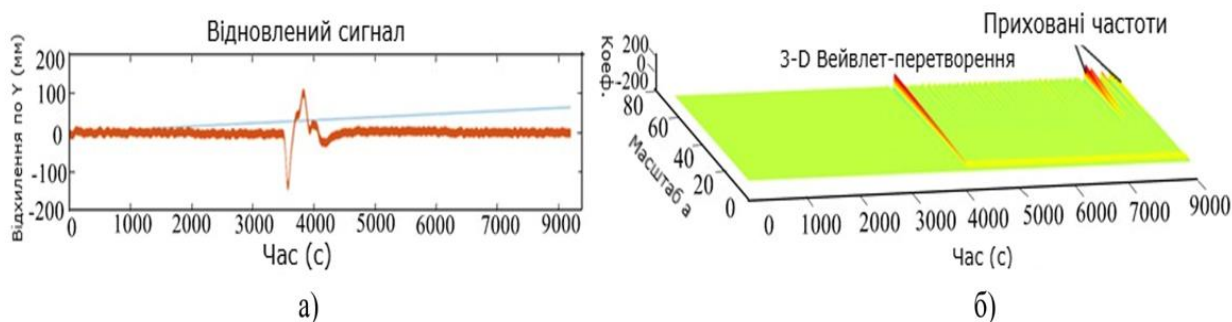


Рис. 7 – Експериментальні 2D та 3D скейлограми БВП для розбалансованої системи РК-4 на частоті обертання 2570 об/хв: а) бокове зміщення розбалансованого вала; б) 3D БВП бокового зміщення розбалансованого ротора.

Таким чином, результати підтверджують (рис. 7а та 7б), що при високій швидкості дисбаланс індукує сильні флуктуації енергії в роторній системі. Аналіз у часово-частотній площині дозволяє виявити численні локальні зміни частоти, які не фіксуються класичними методами. БВП забезпечує високу точність локалізації як у часі, так і за частотою, тому є ефективним інструментом діагностики дисбалансу та інших дефектів у високошвидкісних роторних системах.

Висновки.

У ході дослідження було проведено порівняльний аналіз методів спектрального та часо-частотного перетворення для обробки вібраційних сигналів роторної системи. Класичне ШПФ виявилось ефективним для ідентифікації основних гармонічних складових та оцінки спектрального складу сигналу у стаціонарних режимах. Його застосування дозволило виявити домінуючі частоти, пов'язані з дисбалансом і резонансними явищами.

Однак для дослідження нестационарних процесів, таких як імпульсні збурення, перехідні режими чи локальні дефекти, ШПФ має обмеження, оскільки не дозволяє визначити момент появи частотних компонент. У цьому контексті БВП продемонструвало значну перевагу завдяки можливості детального аналізу сигналу як у частотному, так і в часовому вимірі. За допомогою БВП було виявлено резонансні зони, імпульсні події та приховані моди коливань, невидимі у спектрі Фур'є. Візуалізація скейлограм дозволила локалізувати аномалії з високою точністю.

ДВП забезпечило багаторівневе представлення сигналу, що дало змогу окремо досліджувати високочастотні та низькочастотні компоненти. Такий підхід дозволив виявити короточасні імпульси та змінити структуру сигналу на різних масштабах, що є особливо корисним для побудови систем ранньої діагностики та автоматичного виявлення дефектів.

Експериментальні результати, отримані на роторному стенді РК-4, підтверджують, що для комплексної оцінки технічного стану обладнання доцільно поєднувати ШПФ із методами вейвлет-аналізу. Зокрема, БВП є незамінним інструментом у високошвидкісних системах, де необхідно точно визначити час появи дефекту, а також його частотну природу. Таким чином, вибір методу повинен здійснюватися з урахуванням характеру сигналу, типу очікуваних збурень і вимог до точності діагностики.

Список літератури

1. Tiboni M., Remino C., Bussola R., Amici C. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
2. Явтушенко А. В. Сучасні технології вібраційної діагностики транспортних засобів і промислових механізмів / А. В. Явтушенко, С. О. Губський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – № 1. – С. 87-96.
3. Sopcik P. Detecting and Diagnosing Misalignment in a System [Electronic resource] / CBM Connect. – 2020. – October 2. – Available at: <https://www.cbmconnect.com/detecting-and-diagnosing-misalignments-in-a-system/> (accessed 1 August 2025).
4. Kaur A. Comparative Analysis of Wavelet Transform and Fourier Transform. *Global Journal for Research Analysis*. 2016. Vol. 5, Issue 1. P. 106–108. ISSN 2277–8160. URL: https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent_issues_pdf/2016/January/January_2016_1452608183__42.pdf (accessed 20 August 2025).

5. Черкашин Д. В. Використання вібродіагностики для моніторингу та контролю технічного стану автомобільних компонентів / Д. В. Черкашин, О. Ф. Саєнко, С. О. Губський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – № 2. – С. 97-107.
6. В. П. Квасніков і А. П. Стахова, «СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є», *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*, вип. 2(21), с. 28-33, Груд 2022.
7. Weisinger C. *The Fourier Transform for Anomaly Detection* [Electronic resource] / KNIME Blog. – 2022. – February 21. – Available at: <https://www.knime.com/blog/fourier-transform-anomaly-detection> (accessed 02 September 2025).
8. Дрозденко А. *Складність алгоритмів: простими словами про часову складність (Time Complexity)* [Електронний ресурс] / Medium. – 2025. – 15 березня. – Режим доступу: <https://surl.lu/izfaks> (accessed 08 September 2025).
9. Fiveable Content Team. *FFT Algorithms and Computational Efficiency* [Електронний ресурс] / Fiveable. – 2025. – Вересень. – Режим доступу: <https://fiveable.me/fourier-analysis-wavelets-and-signal-processing/unit-8/fft-algorithms-computational-efficiency/study-guide/PyTpHbBaVhhGaMeEN> (accessed 11 September 2025).
10. *FFT Vibration Analyzer – What Is FFT Analysis & How It Works?* [Електронний ресурс] / Tomarok. – Режим доступу: <https://tomarok.com/fft-vibration-analyzer-what-is-fft-analysis-how-it-works/> (accessed 12 September 2025).
11. Lilly J. M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. Vol. 473. Article ID 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>.
12. Аносов А. О., Проценко М. М., Дубинко О. Л., Павлушко М. Я. Застосування вейвлет-перетворення для аналізу цифрових сигналів / А. О. Аносов, М. М. Проценко, О. Л. Дубинко, М. Я. Павлушко // *Сучасний захист інформації*. – 2018. – № 1(33). – С. 38–44. – ISSN 2409-7292. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/340828504_ZASTOSUVANNA_VEJVLET-PERETVORENNA_DLA_ANALIZU_CIFROVIH_SIGNALIV.
13. Граняк В. Ф. Використання дискретного вейвлет аналізу вібро-акустичного сигналу для виявлення дебалансу ротора обертових електричних машин / В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацев, В.В. Кухарчук // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. - 2021. - № 1. - С. 32-40. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2021_1_7.
14. Christopher Torrence and Gilbert Compo, "A Practical Guide to Wavelet Analysis", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.79, no.1, p.61-78. January 1998.
15. Konstantinovskiy T. *Wavelet Transform: A Practical Approach to Time-Frequency Analysis*. Medium. 2024, October 5. URL: <https://medium.com/pythoneers/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b> (accessed 17 September 2025).
16. *Continuous Wavelet Transform and Scale-Based Analysis* [Електронний ресурс] / MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html> (accessed 19 September 2025).
17. *Continuous Wavelet Transform (CWT)* [Електронний ресурс] / Weisang. – Режим доступу: <https://www.weisang.com/en/support/know/flexpro-documentation/additional-topics/continuous-wavelet-transformation-cwt/> (accessed 20 September 2025).
18. Habbouche H., Benkedjough T., Amirat Y., Benbouzid M. A Wavelet Transform-Based Transfer Learning Approach for Enhanced Shaft Misalignment Diagnosis in Rotating Machinery [Електронний ресурс] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Article 341. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/341> (accessed 23 September 2025).
19. *Discrete Wavelet Transform (DWT)* [Електронний ресурс] / PyWavelets Documentation. – Режим доступу: <https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/dwt-discrete-wavelet-transform.html> (accessed 26 September 2025).
20. *Discrete Wavelet Transform* [Електронний ресурс] / DataView. – Режим доступу: <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/dataview/tutorials/dwt.html> (accessed 27 September 2025).
21. *Wavelet Transforms* [Електронний ресурс] / GeeksforGeeks. – Останнє оновлення: 08.05.2025. – Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/data-science/wavelet-transforms/> (accessed 2 October 2025).
22. *Introduction to Wavelet Families* [Електронний ресурс] / MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html> (accessed 10 October 2025).
23. Wang W. J. *Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis* [Електронний ресурс] / *Shock and Vibration*, Wiley. – 1996. – Vol. 3, No. 1. – С. 17–26. – DOI:10.1155/1996/375635. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/273515567_Wavelet_Transform_in_Vibration_Analysis_for_Mechanical_Fault_Diagnosis (accessed 20 October 2025).

24. Tchomeni B. X., Alugongo A. *Experimental diagnosis of multiple faults on a rotor-stator system by fast Fourier transform and wavelet scalogram* [Электронний ресурс] / *Extrica*. – 2019. – 30 червня. – Режим доступу: <https://www.extrica.com/article/19639> (accessed 31 October 2025).

References (transliterated)

1. Tiboni M, Remino C, Bussola R, Amici C. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
2. Yavtushenko, A. V. Modern technologies for vibration diagnostics of vehicles and industrial mechanisms / A. V. Yavtushenko, S. O. Gubsky // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction : collection of scientific works / National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2025. – No. 1. – Pp. 87-96.
3. Sopcik P. Detecting and Diagnosing Misalignment in a System [Electronic resource] / *CBM Connect*. – 2020. – October 2. – Available at: <https://www.cbmconnect.com/detecting-and-diagnosing-misalignments-in-a-system/> (accessed 1 August 2025).
4. Kaur A. Comparative Analysis of Wavelet Transform and Fourier Transform. *Global Journal for Research Analysis*. 2016. Vol. 5, Issue 1. P. 106–108. ISSN 2277–8160. URL: https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent_issues_pdf/2016/January/January_2016_1452608183__42.pdf (accessed 20 August 2025).
5. Cherkashyn, D. V. Use of vibration diagnostics for monitoring and controlling the technical condition of automotive components / D. V. Cherkashyn, O. F. Saienko, S. O. Gubskiy // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Construction: collection of scientific works / National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2024. – No. 2. – P. 97-107.
6. V. P. Kvasnikov and A. P. Stakhova, “Spectral Analysis of Vibration Signals Using Fourier Transform,” *Collection of Scientific Papers of the Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality*, vol. 2(21), pp. 28-33, December 2022.
7. Weisinger C. *The Fourier Transform for Anomaly Detection* [Electronic resource] / *KNIME Blog*. – 2022. – February 21. – Available at: <https://www.knime.com/blog/fourier-transform-anomaly-detection> (accessed 02 September 2025).
8. Drozenko, A. *Complexity of algorithms: simple words about time complexity* [Electronic resource] / *Medium*. – 2025. – March 15. – Access mode: <https://surl.lu/izfaks> (accessed September 8, 2025).
9. Fiveable Content Team. *FFT Algorithms and Computational Efficiency* [Electronic resource] / *Fiveable*. – 2025, September. – URL: <https://fiveable.me/fourier-analysis-wavelets-and-signal-processing/unit-8/fft-algorithms-computational-efficiency/study-guide/PyTpHBaBhhGaMeEN> (accessed 11 September 2025).
10. *FFT Vibration Analyzer – What Is FFT Analysis & How It Works?* [Electronic resource] / *Tomarok*. – URL: <https://tomarok.com/fft-vibration-analyzer-what-is-fft-analysis-how-it-works/> (accessed 12 September 2025).
11. Lilly J. M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. Vol. 473. Article ID 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>.
12. Anosov, A. O., Protsenko, M. M., Dubinko, O. L., Pavlunko, M. Ya. Application of wavelet transform for digital signal analysis / A. O. Anosov, M. M. Protsenko, O. L. Dubinko, M. Ya. Pavlunko // *Modern Information Protection*. – 2018. – No. 1(33). – P. 38–44. – ISSN 2409-7292. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/340828504_ZASTOSUVANNA_VEJVLET-PERETVORENNA_DLA_ANALIZU_CIFROVIH_SIGNALIV.
13. Hranyak, V. F. Use of discrete wavelet analysis of vibroacoustic signals to detect rotor imbalance in rotating electrical machines / V. F. Hranyak, S. Sh. Katsiv, V. V. Kukharchuk // *Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: Informatics, Cybernetics, and Computing Technology*. – 2021. – No. 1. – P. 32-40. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2021_1_7.
14. Christopher Torrence and Gilbert Compo, "A Practical Guide to Wavelet Analysis", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.79, no.1, p.61-78. January 1998.
15. Konstantinovskiy T. Wavelet Transform: A Practical Approach to Time-Frequency Analysis. *Medium*. 2024, October 5. URL: <https://medium.com/pythoneers/wavelet-transform-a-practical-approach-to-time-frequency-analysis-662bdadeb08b> (accessed 17 September 2025).
16. *Continuous Wavelet Transform and Scale-Based Analysis* [Electronic resource] / *MathWorks*. – URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html> (accessed 19 September 2025).

17. *Continuous Wavelet Transform (CWT)* [Electronic resource] / Weisang. – URL: <https://www.weisang.com/en/support/know/flexpro-documentation/additional-topics/continuous-wavelet-transformation-cwt/> (accessed 20 September 2025).
18. Habbouche H., Benkedjough T., Amirat Y., Benbouzid M. A Wavelet Transform-Based Transfer Learning Approach for Enhanced Shaft Misalignment Diagnosis in Rotating Machinery [Electronic resource] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Article 341. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/341> (accessed 23 September 2025).
19. *Discrete Wavelet Transform (DWT)* [Electronic resource] / PyWavelets Documentation. – URL: <https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/dwt-discrete-wavelet-transform.html> (accessed 26 September 2025).
20. *Discrete Wavelet Transform* [Electronic resource] / DataView. – URL: <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/dataview/tutorials/dwt.html> (accessed 27 September 2025).
21. *Wavelet Transforms* [Electronic resource] / GeeksforGeeks. – Last updated: 08.05.2025. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/data-science/wavelet-transforms/> (accessed 2 October 2025).
22. *Introduction to Wavelet Families* [Electronic resource] / MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html> (accessed 10 October 2025).
23. Wang W. J. *Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis* [Electronic resource] / *Shock and Vibration*, Wiley. – 1996. – Vol. 3, No. 1. – P. 17–26. – DOI:10.1155/1996/375635. – URL: https://www.researchgate.net/publication/273515567_Wavelet_Transform_in_Vibration_Analysis_for_Mechanical_Fault_Diagnosis (accessed 20 October 2025).
24. Tchomeni B. X., Alugongo A. *Experimental Diagnosis of Multiple Faults on a Rotor-Stator System by Fast Fourier Transform and Wavelet Scalogram* [Electronic resource] / *Extrica*. – 2019. – June 30. – URL: <https://www.extrica.com/article/19639> (accessed 31 October 2025).

Надійшла (received) 31.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Черкашин Дмитро Володимирович (Cherkashyn Dmytro) – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; e-mail: sneyk74@gmail.com.

Саєнко Олексій Федорович (Saienko Oleksii) – аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: oleksii.f.saienko@gmail.com.

Явтушенко Андрій Володимирович (Yavtushenko Andrii) - аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9829-5482>; e-mail: andrii.yavtushenko@gmail.com.

Бабай Юрій Володимирович (Babay Yuriy) - аспірант кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1882-0472>; e-mail: urababay@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Hubsnyi Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

СТЕПАНОВ М. С., ЛІТОВЧЕНКО П. І., ІВАНОВА М. С., ХОДАКОВ Л. В., ГАСАНОВ М. І., РУДНЄВ О. В.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИХОДЖУВАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ В РІЗНОМАНІТНИХ УМОВАХ

Процес виходжування при круглому шліфуванні забезпечує мінімізацію залишкових напружень в обробленому матеріалі та поліпшення якості поверхні, особливо при обробці матеріалів з високою твердістю, оскільки знижується ймовірність появи мікротріщин та покращується шорсткість і мікроструктура поверхні. При цьому ефективність процесу виходжування залежить від різних факторів: режиму різання, розмірів заготовки, тривалості процесу, ріжучої здатності круга, швидкості знімання матеріалу та ін. В статті наведено результати численних експериментальних досліджень запропоновано математичні залежності для розрахунку сталої часу шліфування та кількості ходів стола, що дозволяє закінчувати обробку заготовок зі строго визначеною швидкістю знімання матеріалу, забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів партії деталей, що обробляються. На основі експериментальних досліджень виконано оцінювання адекватності отриманих залежностей реальному процесу шліфування, при якому встановлено високу збіжність розрахункових і експериментальних величин. Відхилення миттєвих значень досліджуваних параметрів від середнього значення не перевищувало 10%. Наводяться також результати експериментальних досліджень по визначенню впливу часу виходжування на досягну шорсткість поверхні шліфованої деталі при торцециліндровому шліфуванні. Встановлено, що при збільшенні часу шліфування спостерігається зниження шорсткості, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга. Визначено точний момент часу закінчення процесу виходжування, що сприяє отриманню оптимальної якості обробленої поверхні. Отримані розрахункові залежності рекомендуються для використання при проєктуванні автоматизованих систем механічної обробки деталей шліфуванням.

Ключові слова: виходжування, стала часу, кількість ходів стола, час виходжування, сила різання, режим різання, швидкість шліфувального круга, швидкість знімання матеріалу.

STEPANOV M., LITOVCHENKO P., IVANOVA M., KHODAKOV L., HASANOV M., RUDNEV A.

GRINDING EFFICIENCY IN VARIOUS CONDITIONS

The process of nursing during cylindrical grinding ensures the minimization of residual stresses in the processed material and the improvement of the surface quality, especially when processing materials with high hardness, since the probability of microcracks is reduced and the roughness and microstructure of the surface are improved. At the same time, the effectiveness of the nursing process depends on various factors: cutting mode, workpiece dimensions, process duration, cutting ability of the circle, material removal rate, etc. The article presents the results of numerous experimental studies and proposes mathematical dependencies for calculating the grinding time constant and the number of table passes during nursing during cylindrical external and internal and face grinding, which allows finishing the processing of workpieces with a strictly defined material removal rate, provides minimal dispersion of the accuracy of the dimensions of the batch of parts being processed. Based on experimental studies, an assessment of the adequacy of the obtained dependencies to the real grinding process was performed, in which a high convergence of the calculated and experimental values was established. The deviation of the instantaneous values of the studied parameters from the average value neither for the grinding time constant nor for the table stroke number did not exceed 10%. The results of experimental studies on determining the influence of the cooling time on the achievable surface roughness of the ground part are also presented. It was established that with an increase in the grinding time, a decrease in roughness is observed, and this nature of the change in roughness is valid for all the studied grinding wheel speeds. The exact moment of the end of the cooling process was determined, which contributes to obtaining the optimal quality of the processed surface. The obtained calculated dependencies are recommended for use in the design of automated systems for mechanical processing of parts by grinding.

Keywords: cooling, time constant, number of table strokes, cooling time, cutting force, cutting mode, grinding wheel speed, material removal rate.

1. Вступ. Традиційний цикл обробки на круглошліфувальних верстатах складається з: форсованої подачі до торкання круга із заготовкою; шліфування з попередньою подачею (чорнове шліфування); шліфування з остаточною подачею (чистове шліфування); виходжування. Основна частина припуску видаляється із заготовки під час використання попередньої і остаточної подач. Однак при вимиканні остаточної подачі шліфувального круга в період виходжування також здійснюється знімання матеріалу деталі внаслідок пружних деформацій технологічної системи.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Ускладнення обробки з монотонним пониженням подачі (швидкості знімання матеріалу) здійснюється з метою підвищення продуктивності обробки з врахуванням обмежень у вигляді забезпечення отриманої точності деталей [1].

В роботі [2] констатується, що оптимальним є цикл шліфування, який включає тільки етап виходжування, а більш близьким до оптимального варіанту є одноступінчастий цикл з експоненціальною зміною у часі величини подачі.

Процес виходжування при шліфуванні досліджено достатньо ґрунтовно.

Встановлено, що при розробці автоматизованих циклів шліфування важливо знати характер зміни пружних переміщень в технологічній системі з течею часу обробки. Обробка заготовки без подачі на останньому ході виходжування дозволяє суттєво знизити величину пружних переміщень, тим самим забезпечити завдану точність обробленої деталі.

Раніше було отримано формулу, що описує змінення радіуса заготовки за період виходжування:

$$\Delta R = \int_{S_k}^{S_{ok}} \frac{\pi d_s B_{ш}}{k_p j_{\Sigma}} \Delta V = \frac{\pi d_s B_{ш}}{k_p j_{\Sigma}} (S_{ок} - S_k),$$

де d_3 – діаметр заготовки, що шліфується; k_p – коефіцієнт ріжучої здатності шліфувального круга; $B_{ш}$ – ширина шліфування; J_{Σ} – сумарна жорсткість технологічної системи; S_k і $S_{ок}$ – швидкість знімання матеріалу на початку і в кінці виходжування, відповідно.

Також отримано формулу для визначення часу виходжування [3]:

$$\tau_{вих} = \frac{1}{J_{\Sigma} k_{pl}} \ln \frac{t_{M2}}{t_{M3}}$$

де k_{pl} – лінійний коефіцієнт різання, що визначається за залежністю: $k_{pl} = \frac{k_p}{\pi d_3 B_{ш}}$; t_{M2} і t_{M3} – робоча подача і подача виходжування, відповідно.

На теперішній час теоретично визначені умови зменшення величини пружного переміщення і основного часу обробки [4].

Ефективність виходжування можна оцінити поправочними коефіцієнтами, які вводяться в базові моделі багатовимірнього дисперсного аналізу з постійними факторами, пошук яких виконано без виходжування. При чому найбільш значимо виходжування може відобразитися на зменшенні висотного параметра шорсткості та збільшенні відносної опорної довжини профіля [5].

Разом з тим, недостатньо інформації по точному визначенню кількості ходів виходжування (наприклад, при повздовжньому круглому шліфуванні). Також відсутній порівняльний аналіз особливостей виходжування при використанні різних схем шліфування, котре виконується з різними швидкостями різання.

Практично не досліджена степінь впливу затуплення круга на процеси виходжування. Мало досліджено вплив швидкості різання, що передує виходжуванню і подачі на параметри процесу шліфування і якість обробленої поверхні.

3. Мета дослідження. Теоретичне і експериментальне дослідження впливу параметрів режиму різання на ефективність виходжування при різних схемах круглого шліфування та визначення залежностей для розрахунку головних параметрів виходжування – сталої часу шліфування та потрібної кількості ходів стола.

4. Викладення основного матеріалу.

Кругле зовнішнє повздовжнє шліфування.

Відомо [6] що якість поверхонь, оброблених шліфуванням, визначається кінцевою швидкістю знімання металу із заготовки. З метою підвищення продуктивності важливо знати момент часу, коли швидкість знімання металу буде дорівнювати заданій і, отже, при умові отримання потрібного розміру, можна давати команду на закінчення циклу шліфування. Завдяки цьому, буде зменшено час остаточного етапу шліфування, а отже, буде досягнуто мінімальний час обробки в цілому.

Одним із найважливіших параметрів процесу шліфування є стала часу, оскільки являє собою сумарну оцінку двох основних величин – коефіцієнта ріжучої здатності круга і приведеної до зони різання жорсткості технологічної системи.

Коефіцієнт пропорційності між пружними деформаціями технологічної системи і швидкістю знімання металу (або силою різання) характеризує ефективність процесу шліфування і називається сталою часу процесу.

Відомо [7], що при круглому зовнішньому шліфуванні при вимиканні подачі під час виходжування, швидкість знімання матеріалу (сила різання) змінюється за експоненціальним законом. Тому, для визначення сталої часу можна скористатися наступною властивістю експоненти.

Для етапу виходжування (при зчитуванні показників з датчика сили) можна записати:

$$P_i \cdot e^{\frac{\Delta t}{T_n}} = P_{i+1}, \quad (1)$$

$$P_i \cdot e^{\frac{\Delta t}{T_n}} = P_{i+2}. \quad (2)$$

Поділивши рівняння (1) на рівняння (2) та прологарифмувавши обидві частини, отримуємо:

$$\frac{\Delta t}{T_n} = \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}. \quad (3)$$

З рівняння (3) визначаємо сталу часу:

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}, \quad (4)$$

де T_n – стала часу шліфування; Δt – проміжок часу, через який проводиться вимірювання сили різання; P_{i+1} , P_{i+2} – величини виміряної через проміжок часу Δt сили різання.

При повздовжньому шліфуванні під час одного ходу стола силу різання можна вважати незмінною ($P = \text{const}$). При виходжуванні сила різання зменшується дискретно від ходу до ходу стола, залишаючись при цьому протягом одного ходу стола малозмінною, тобто, практично постійною. Для визначення сталої часу виходжування вимірювання сили різання проводили під час кожного ходу стола.

Час одного ходу стола визначали за залежністю

$$\Delta t = \frac{B_3}{S_{cm}}, \tag{5}$$

де B_3 – довжина частини заготовки, яка шліфується; S_{cm} – швидкість повздовжнього переміщення стола.

З врахуванням викладеного вище, формула (4) набуває наступного вигляду

$$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}. \tag{6}$$

При повздовжньому шліфуванні змінення сили різання на етапі виходжування здійснюється через проміжки часу, що дорівнюють часу одного ходу стола відповідно до формули (5).

Змінення сили різання при виходжуванні можна представити у вигляді (рис. 4,а). Якщо видалити прямолінійні ділянки, що відповідають силі різання за період одного ходу стола, та з'єднати початкові точки цих ділянок, можна отримати експоненту, що показана на рис.1,б.

З врахуванням виразу (3), для цієї експоненти можна записати

$$\frac{t}{T_n} = \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \tag{7}$$

де P_{\max} – значення сили різання в момент початку виходжування; P_{\min} – значення сили різання при якому закінчується процес обробки; t – час, протягом якого сила різання змінюється від максимального до мінімального значення.

Із виразу (7) можна визначити час t

$$t = T_n \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}. \tag{8}$$

Якщо відомий час одного ходу стола (див. формулу (5)), можна визначити кількість ходів стола, після здійснення яких установиться необхідне значення сили різання.

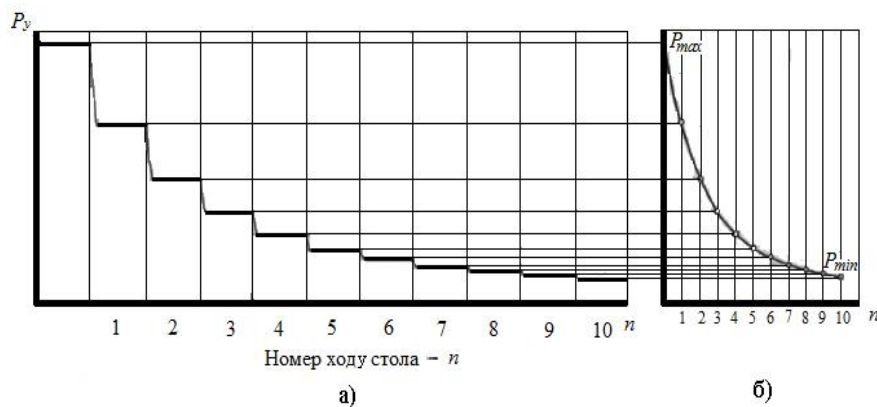


Рис. 1 – Графік змінення сили різання при виходжуванні

$$n = \frac{t}{\Delta t} = \frac{T_n \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}}{\Delta t}. \tag{9}$$

Підставивши значення Δt із формули (5) у формулу (9), отримаємо остаточний вид виразу для розрахунку

кількості ходів виходжування

$$n = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (10)$$

Перевірку коректності отриманих залежностей проводили у два етапи. На першому етапі за експериментальними даними визначали сталу часу T_n . На другому етапі, з врахуванням значення T_n , розраховували кількість ходів виходжування, що потрібні для встановлення заданої сили різання і виконували контрольне шліфування. Під час першого контрольного шліфування деталь обробляли методом повздовжніх проходів, по закінченні чого здійснювали декілька ходів стола без подачі на глибину. Під час виходжування здійснювали вимірювання сили різання на кожному ході стола. Після аналізу отриманої інформації (наприклад, обробки осцилограми) по отриманим кожному двом значенням сили різання по формулі (6) визначали сталу часу шліфування. Потім, за декількома значеннями T_n визначали його середнє значення, яке використовували для подальшого розрахунку кількості ходів виходжування.

Після цього, проводили повторне шліфування заготовки із фіксацією змінення значень сили різання при виходжуванні. Із осцилограми вибирали значення сили різання на i -тому, наприклад, 5-тому ході стола при виходжуванні і підставляли його у формулу (10). З цієї формули визначали розрахунковий номер ходу стола при виходжуванні і порівнювали його з фактичним номером ходу, під час якого брали значення сили різання P_i . По відповідності фактичної розрахункової величини кількості ходів n можна робити висновок про достовірність отриманих залежностей і можливості їх використання в алгоритмах управління процесами повздовжнього шліфування. Експерименти проводили при шліфуванні заготовки зі сталі Р6М5 діаметром $D_3 = 90$ мм и довжиною $B_3 = 490$ мм абразивним кругом 24A25НСМ27К6. Використовували наступні режими шліфування:

- швидкість шліфувального круга – 50м/с;
- швидкість повздовжнього переміщення стола $S_{cm} = 3000$ мм/хв;
- глибина різання – 0.01 мм;
- кількість ходів виходжування – 10;
- припуск, що знімався за час шліфування – 0,2 мм.

Обробку проводили на верстаті 3М162И.

Результати вимірювання сили різання на кожному ході стола при виходжуванні і розрахункові значення сталої часу шліфування наведені в табл. 1.

В табл. 2 наведено результати розрахункового визначення номера ходу виходжування в момент встановлення заданої сили різання. Результати отримано при контрольному шліфуванні і вимірюванні сили різання.

Аналіз результатів наведених у табл. 1 і 2 показує, що формули (6) і (10) можуть бути використані для визначення сталої часу і кількості ходів виходжування при повздовжньому зовнішньому шліфуванні.

Таким чином, якщо відома стала часу повздовжнього шліфування і величина радіальної сили різання на останньому перед виходжуванням проході, можна розрахувати номер ходу стола, при якому встановлюється задана величина сили різання (швидкість знімання матеріалу). Це дозволить закінчувати обробку заготовок зі суворо визначеною швидкістю знімання матеріалу, що забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів (діаметра) у всій партії деталей, що обробляються.

Табл. 1 – Результати вимірювання сили різання при виходжуванні

№ ходу	P_{yi}, H	$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}, \text{c}$	$T_{нсер}, \text{c}$
0	405,0	-	32,63
1	301,0	33,0	
2	221,0	31,68	
3	161,0	30,90	
4	117,0	30,66	
5	86,2	32,04	
6	64,5	33,78	
7	48,3	34,20	
8	36,1	33,66	
9	26,6	362,10	
10	20,0	34,32	

Внутрішнє шліфування.

Вимірювання сили різання при внутрішньому шліфуванні викликає певні труднощі, оскільки заготовка при обробці закріплюється в патроні і використання традиційних методів тензометрії (наприклад, за допомогою тензометричних центрів) не представляється можливим.

Установка (наклейка) датчиків безпосередньо на вузли верстату (патрон, консоль шпинделя), що контактують з оброблюваною заготовкою, також неможлива внаслідок їх обертання з великою частотою. З цієї причини виміри складових сил різання були замінені на виміри ефективних потужностей шліфування.

Потужність шліфування визначали за допомогою ватметра, який був підключений в ланцюг живлення приводу обертання шліфувальної головки.

Аналітично ефективну потужність можна визначити за формулою:

$$N_{ef} = N_n - N_{xx} ,$$

де N_n і N_{xx} – споживана потужність і потужність холостого ходу, відповідно.

Табл. 2 – Результати розрахунку номера ходу стола при виходжуванні в момент, коли завдана величина сили різання приймає стає значення

№ ходу	P_{yi} , Н	$n = \frac{S_{cm} T_{nsep}}{B_3} \ln \frac{P_{max}}{P_{max}}$	$\left \frac{n_{\phi} - n_{розрах}}{n_{\phi}} \right \cdot 100, \%$
0	484,0	-	-
11	345,1	1,12	12
12	264,1	2,02	1
13	201,3	2,92	2,6
14	152,7	3,84	1,5
15	110,1	4,93	1,4
16	79,8	6,00	0
17	56,2	7,17	2,4
18	45,1	7,90	1,25
19	31,9	9,05	0,5
20	24,8	9,89	1,1

Приймаючи до уваги залежності (4), (5) і (6), сталу часу та кількість ходів виходжування визначаємо за формулами:

$$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{N_{i+1}}{N_{i+2}}} ; \tag{11}$$

$$n = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{max}}{M_{min}} , \tag{12}$$

де N_{i+1} , N_{i+2} – величини вимірюваної потужності через проміжок часу Δt ; N_{max} , N_{min} – значення ефективної потужності шліфування в момент початку і кінця виходжування, відповідно.

Результати розрахунку T_n для 20 ходів стола наведено в табл. 3. Аналіз результатів розрахунку показує, що при внутрішньому поздовжньому шліфуванні відхилення величини T_n від номінального не перевищує 10%.

Табл. 3 – Результати виміру і ефективної потужності і розрахунків сталої часу при внутрішньому шліфуванні

Номер ходу стола	N_{ef} , Вт	$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{N_{i+1}}{N_{i+2}}}$, с	T_{nsep} , с	$\left \frac{T_n - T_{nsep}}{T_{nsep}} \right \cdot 100 \%$, %
0	310	107,1	111,8	4,2
1	295	102,1		8,6
2	282	113,8		1,8
3	271	119,4		6,8
4	260	114,5		2,4
5	249	120,7		7,9
6	239	105,0		6,1
7	228	123,0		10,0

8	219	105,9		5,3
9	209	112,4		0,5
10	200	121,2		8,4
11	192	116,3		4,0
12	184	111,3		0,5
13	176	106,4		4,8
14	168	101,4		9,3
15	160	110,6		1,1
16	153	105,6		5,5
17	146	117,9		5,4
18	140	113,0		1,1
19	134	108,0		3,4
20	128	-		-

Для перевірки адекватності отриманих залежності (12) реальним умовам обробки шліфували заготовку із сталі ХВГ на наступних режимах:

- швидкість переміщення стола – 2 мм/хв;
- глибина різання – 0,001 мм;
- частота обертання заготовки – 150 об/хв.

В період виходжування фіксували значення потужності, що споживається приводом внутрішньошліфувальної головки на i -тому (наприклад 5-му) ході стола. З цієї величини потужності вираховували значення потужності холостого хода і отримане значення N_{ef} підставляли у формулу (13)

$$n_{розрах} = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{ef\max}}{N_{efi}} \quad (13)$$

За формулою (13) визначали розрахунковий номер ходу стола при виходжуванні і порівнювали його з фактичним номером ходу, при якому вимірювали значення потужності. По відповідності фактичної і розрахункової величини ходу $n_{розрах}$ проводили оцінку достовірності отриманої залежності. Аналіз результатів цих розрахунків, наведений у табл. 4, говорить про добру збіжність розрахункових і експериментальних величин номера ходу стола.

Табл. 4 – Результати виміру ефективної потужності шліфування, фактичний і розрахунковий номер ходу стола, погіршність розрахунку номера ходу стола при внутрішньому повздовжньому шліфуванні

Фактичний номер ходу стола	N_i , Вт	$n_{розрах} = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{ef\max}}{N_{efi}}$	$\left \frac{n_{ф} - n_{розрах}}{n_{ф}} \right \cdot 100, \%$
0	328	-	-
1	313	1,057	5,7
2	298	2,166	8,4
3	284	3,25	8,3
4	270	4,39	9,7
5	267	4,64	7,2
6	250	6,13	2,1
7	235	7,53	7,5
8	224	8,61	7,6
9	215	9,53	5,9
10	204	10,72	7,2
20	141	19,10	4,5
30	85	30,49	1,6
40	58	39,13	2,1
50	33	51,80	3,6

Торцекругле (суміщене) шліфування.

У ході експерименту визначали вплив часу виходжування на шорсткість обробленої поверхні (торцевої і циліндричної). Шліфування проводили на торцекруглошліфувальному полуавтоматі моделі 3Т161Е зі

швидкостями різання 35, 50 і 60 м/с. Використовували шліфувальний круг 24A40HCM26K5. В якості МОР використовували водний розчин (склад 5% емульсола + 0,2% кальцинованої соди + 0,5% NaNO_2), яку подавали у зону різання поливом з витратою 50 $\text{дм}^3/\text{хв}$.

Параметри режиму різання, що використовувалися, наведено у табл. 5.

Табл. 5 – Параметри режиму різання і правки круга при торцекруглому шліфуванні.

Параметри режиму різання і правки		Швидкість шліфувального круга, м/с		
		35	50	60
Швидкість заготовки, V_z , м/хв		33		50
Частота обертання заготовки, n_z , об/хв		260		390
Врізна подача, V , мм/хв	попередня, $V_{\text{ноп}}$	1,0	1,5	2,5
	остаточна $V_{\text{ост}}$	0,1		0,15
Припуск, Z , мм	загальний $Z_{\text{заг}}$	0,5		
	попередній, $Z_{\text{ноп}}$	0,45		
	остаточний, $Z_{\text{ост}}$	0,05		
Швидкість правки, $V_{\text{пр}}$, мм/об		0,1	0,15	0,25
Глибина правки, $l_{\text{пр}}$, мм		0,03		

Залежність шорсткості шліфованої поверхні від тривалості виходжування говорить про покращення шорсткості зі збільшенням часу виходжування (рис. 2, 3).

Аналіз графіків на рис. 2, 3 показує, що значне зниження шорсткості спостерігається у перші 4 секунди виходжування, надалі (6-12 сек) зниження шорсткості уповільнюється, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга.

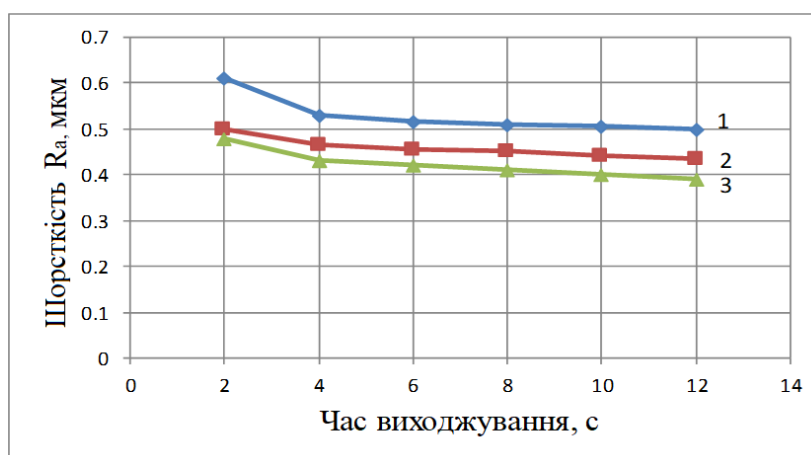


Рис. 2 – Вплив часу виходжування і швидкості шліфувального круга на шорсткість R_a циліндричної поверхні при торцекруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k=35, 50$ і 60 м/с

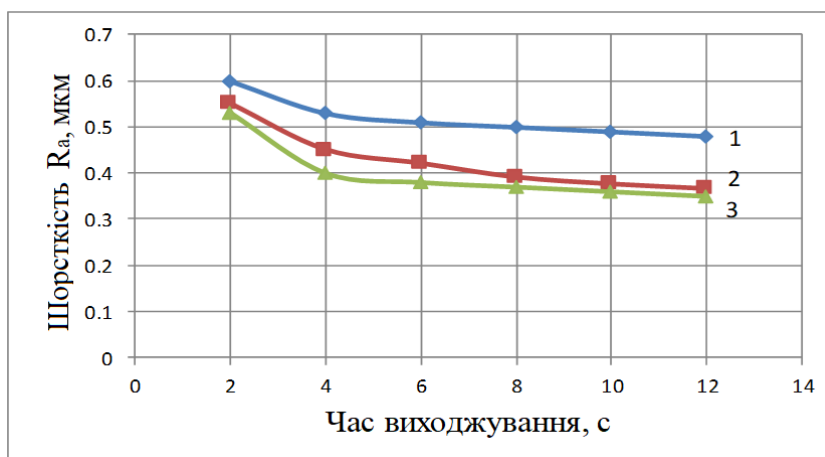


Рис. 3 – Вплив часу виходжування і швидкості шліфувального круга на шорсткість R_a торцевої поверхні при торцекруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k=35, 50$ і 60 м/с

торцекруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k= 35, 50$ і 60 м/с.

Висновки.

1. Отримано залежності для розрахунку сталої часу шліфування та кількості ходів стола при виходжуванні при круглому зовнішньому і внутрішньому шліфуванні. Встановлено, якщо відома стала часу поздовжнього шліфування і величина радіальної сили різання на останньому перед виходжуванням проході, можна розрахувати номер ходу стола, при якому встановлюється завдана величина сили різання (швидкість знімання матеріалу). Це дозволяє закінчувати обробку заготовок зі строго визначеною швидкістю знімання матеріалу, що забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів у всій партії деталей, що обробляються.

2. Для оцінки адекватності отриманих залежностей реальному процесу круглого зовнішнього і внутрішнього шліфування проведено експериментальне дослідження. Аналіз результатів показав добру збіжність розрахункових і експериментальних величин номера ходу стола. Відхилення миттєвих значень від середнього ані по сталій часу шліфування, ані по номеру ходу столу не перевищував 10%.

3. Проведено експериментальні дослідження по встановленню впливу часу виходжування при торцекруглому шліфуванні на досягну шорсткість шліфованої деталі. Встановлено, що при збільшенні часу шліфування спостерігається зниження шорсткості, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга.

4. Встановлено точний момент часу закінчення процесу обробки, що має важливе значення для отримання оптимальної якості обробленої поверхні. Отримані розрахункові залежності для визначення сталої часу шліфування і кількості ходів стола при виходжуванні рекомендуються для використання при проєктуванні автоматизованих систем механічної обробки деталей шліфуванням.

Список літератури:

1. Tönshoff H.K., Peters J., Inasaki I., Paul T. Modelling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1992. – Vol. 41, Issue 2. – Pp. 677-688. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
2. Alves J. A. C., Fernandes U. de B.; Diniz A. E., Bianchi, E. C., de Aguiar P. R., Canarim R. C. Analysis of the Influence of Sparkout Time on Grinding Using Several Lubrication/Cooling Methods // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009. – Vol. 31 (№ 1). – Pp. 47-51.
3. Chiu N., Malkin S. Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1993. – Vol. 42, Issue 1, Pp. 383-387. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62467-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62467-6).
4. Новіков Ф. В. Оптиміальні рішення в технологіях механічної обробки [Електронний ресурс] : монографія / Ф. В. Новіков. – Дніпро : ЛІРА, 2024. – 360 с.
5. Kim, J., Lee, Y. A study on the spark-out in precision grinding by simulation. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1994. – Vol. 17 (3), – Pp. – 347-356. <https://doi.org/10.1080/02533839.1994.9677598>.
6. Lee Yo-J., Kim J-Du. A study of characteristics of grinding by spark-out // The Korean Society of Automotive Engineers, 1993. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 120-125.
7. Hashimoto, F. The Design of an Infeed Cylindrical Grinding Cycle // Inventions, 2020 – Vol. 5 (№ 46), – Pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/inventions5030046>.

References (transliterated)

1. Tönshoff H.K., Peters J., Inasaki I., Paul T. Modelling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1992. – Vol. 41, Issue 2. – Pp. 677-688. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
2. Alves J. A. C., Fernandes U. de B.; Diniz A. E., Bianchi, E. C., de Aguiar P. R., Canarim R. C. Analysis of the Influence of Sparkout Time on Grinding Using Several Lubrication/Cooling Methods // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009. – Vol. 31 (№ 1). – Pp. 47-51.
3. Chiu N., Malkin S. Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1993. – Vol. 42, Issue 1, Pp. 383-387. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62467-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62467-6).
4. Novikov F. V. Optymalni rishennia v tekhnolohiiakh mekhanichnoi obrobky [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / F. V. Novikov. – Dnipro : LIRA, 2024. – 360 p.
5. Kim, J., Lee, Y. A study on the spark-out in precision grinding by simulation. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1994. – Vol. 17 (3), – Pp. – 347-356. <https://doi.org/10.1080/02533839.1994.9677598>.
6. Lee Yo-J., Kim J-Du. A study of characteristics of grinding by spark-out // The Korean Society of Automotive Engineers, 1993. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 120-125.
7. Hashimoto, F. The Design of an Infeed Cylindrical Grinding Cycle // Inventions, 2020 – Vol. 5 (№ 46), – Pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/inventions5030046>.

Надійшла (received) 26.07.2025

Степанов Михайло Сергійович (Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: +38 (057) 707-66-25. e-mail: mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua.

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. +38 (057) 707-61-43, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: +38 (057) 707-66-25; e-mail: maryna.ivanova@khp.edu.ua.

Ходаков Леонід Володимирович (Khodakov Leonid) – завідувач лабораторією шліфування експериментального відділу дослідно-конструкторського бюро шліфувальних верстатів Харківського верстатобудівного виробничого об'єднання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0752-7150>; e-mail: khodakovleonid@gmail.com.

Гасанов Магомедсін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор, кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2161-2386>; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com.

Руднєв Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-6748> тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: aleksandr1827.64@gmail.com.

NEVLIUDOV I., OMAROV M., YEVSIEIEV V., JABRAYILZADE E.

DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING METHOD FOR TRAJECTORY PLANNING IN AN UNCERTAIN DYNAMIC ENVIRONMENT FOR A COLLABORATIVE MOBILE ROBOT

This paper addresses the decision-making problem for trajectory planning of a collaborative mobile robot operating in an uncertain dynamic environment. A risk-aware trajectory planning method based on model predictive control is proposed, which integrates probabilistic state estimation of the robot and its environment with the prediction of dynamic obstacle motion and safety constraints. The method relies on the fusion of data from a camera, an inertial measurement unit, and an ultrasonic sensor, enabling increased robustness and adaptability of trajectory planning under sensor noise and incomplete information. Numerical simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach in terms of maintaining safety margins, control stability, and goal reachability in complex navigation scenarios.

Keywords: collaborative mobile robot, trajectory planning, decision-making, Risk-Aware MPC, uncertain dynamic environment, sensor data fusion, probabilistic navigation.

НЕВЛЮДОВ І. Ш., ОМАРОВ М. А., ЄВСЬЄВ В. В., ДЖАБРАЙЛЗАДЕ Е. А.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЙ ПЕРЕМІЩЕННЯ В НЕВИЗНАЧЕНОМУ ДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ КОЛОБОРАТИВНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

У статті розглянуто задачу прийняття рішень для побудови траєкторій переміщення колаборативного мобільного робота в умовах невизначеного динамічного середовища. Запропоновано ризик-орієнтований метод планування на основі модельно-прогнозуючого керування, що поєднує ймовірнісну оцінку стану робота та середовища з прогнозом руху динамічних перешкод і обмеженнями безпеки. Метод базується на інтеграції даних камери, інерціального вимірювального модуля та ультразвукового датчика, що дозволяє підвищити стійкість і адаптивність траєкторного планування за наявності сенсорних шумів і неповної інформації. Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність підходу з точки зору збереження запасу безпеки, стабільності керування та досяжності цілі в складних навігаційних сценаріях.

Ключові слова: колаборативний мобільний робот, планування траєкторій, прийняття рішень, Risk-Aware MPC, невизначене динамічне середовище, злиття сенсорних даних, ймовірнісна навігація.

Introduction.

The rapid development of collaborative robots and the Industry 5.0 concept is driving an increase in demand for safe and intelligent navigation of mobile robots in environments where people, equipment, and moving objects are simultaneously present [1-5]. In such conditions, classical deterministic trajectory planning methods are insufficient because they are unable to adequately account for the uncertainty of sensory measurements and the unpredictable dynamics of obstacles [6-9]. The task of real-time decision-making becomes particularly relevant when the robot must ensure the reachability of the target while maintaining a guaranteed level of interaction safety [10-13]. The integration of heterogeneous sensors, such as a camera, inertial module, and ultrasonic sensors, creates additional challenges related to the processing of noisy and partially incomplete data [14-16]. Therefore, it is important to develop methods that combine probabilistic assessment of the environment with optimal control based on the prediction of future system behavior. A risk-oriented approach to trajectory planning allows formalizing safety requirements in the form of quantitative criteria and constraints, which is critical for collaborative scenarios [17-19]. In this context, the development of a decision-making method for constructing trajectories in an uncertain dynamic environment is a scientifically and practically significant task.

The aim of the study.

The aim of the study is to improve the quality of navigation and control parameters of a collaborative robot. This is achieved by reducing the risk of collisions, increasing safety margins, and improving motion stability in uncertain dynamic environments. To this end, a special decision-making method is being developed to improve control accuracy and trajectory planning adaptability. The method takes into account the probabilistic uncertainty of robot localization and the prediction of obstacle movement. As a result, more reliable and predictable behavior of the mobile robot during navigation is ensured.

Development of a decision-making method for constructing trajectories in an uncertain dynamic environment for a collaborative robot.

In the current context of collaborative robotics development, the task of constructing safe and adaptive trajectories for mobile robots in an uncertain and dynamic environment characterized by incomplete sensory information and the presence of moving obstacles is of particular relevance [20]. To effectively solve this problem, it is necessary to apply decision-making methods that combine sensory fusion, robot state estimation, and probabilistic modeling of the environment. The proposed approach is focused on taking into account measurement uncertainty and environmental dynamics in order to ensure a higher level of safety and stability of movement in collaborative scenarios of interaction with humans. The implementation of the method involves the integration of motion models, sensory data, and risk-

© I. Nevliudov, M. Omarov, V. Yevsieiev, E. Jabrayilzade. 2026

oriented optimization criteria, which forms the basis for building a generalized architecture of a collaborative mobile robot decision-making system. The general architecture of the method under development consists of five interconnected blocks, shown in Figure 1.

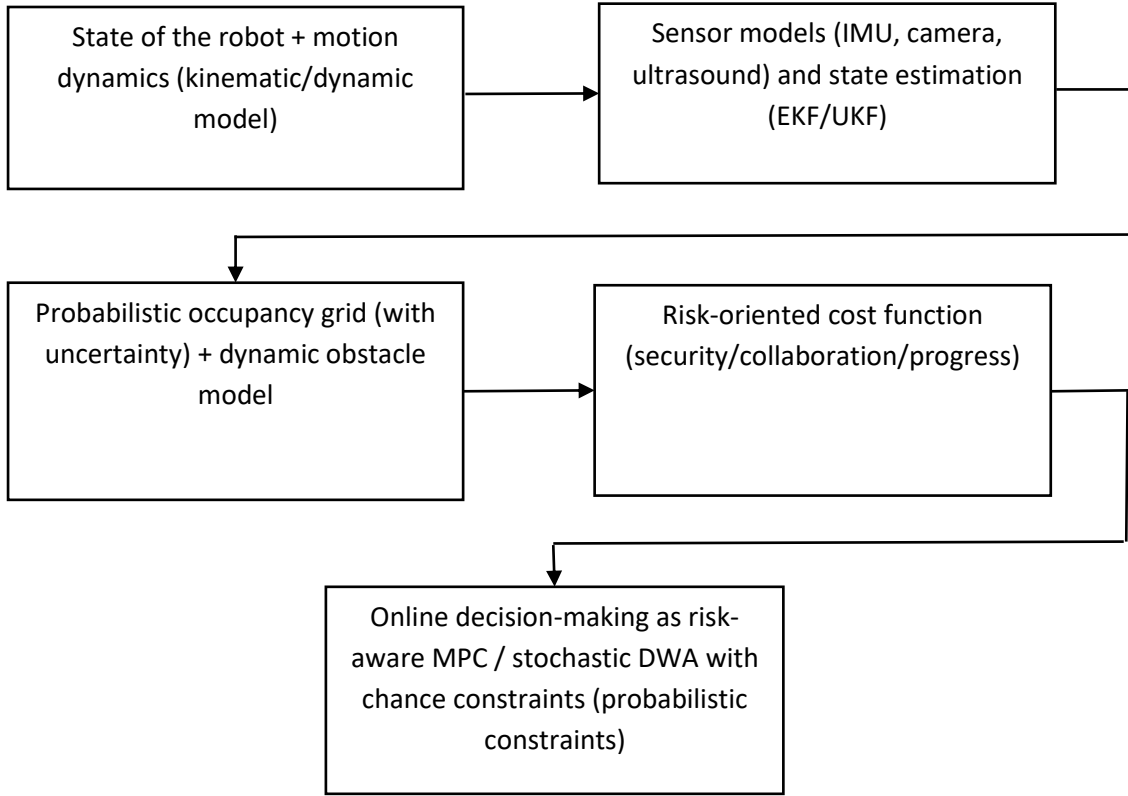


Figure 1 – General architecture of the method under development

A model of the state of motion and movement for 2D navigation, enabling the representation of a joint description of orientation, velocities, and slow drifts of the Inertial Measurement Unit (IMU) for stable filtering and prediction in the form of the next state vector.

$$\mathbf{x}_k = [x_k, y_k, \psi_k, v_k, w_k, b_{a,k}, b_{g,k}]^T \quad (1)$$

Where: x, y - coordinates of a robot in a global coordinate system (CS); ψ - yaw in global CS; v - linear speed (along the hull axis); w - yaw angular velocity; b_a - accelerometer bias; b_g - gyroscope bias along the yaw axis.

We will construct a discrete kinematic model of a mobile robot based on the unicycle model [21], which makes it possible to predict the state at a step Δt under the action of controls (acceleration and angular acceleration) taking into account process noise:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_k \cos \psi_k \Delta t + w_{x,k} \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \sin \psi_k \Delta t + w_{y,k} \\ \psi_{k+1} &= \psi_k + w_k \Delta t + w_{\psi,k} \\ v_{k+1} &= v_k + a_k \Delta t + w_{v,k} \\ w_{k+1} &= w_k + \alpha_k \Delta t + w_{w,k} \end{aligned} \quad (2)$$

Where: Δt - discrete integration step; a_k - controlling linear acceleration or velocity increment; α_k - steering angle acceleration or increment; w ; $w_x, w_y, w_\psi, w_v, w_w$ - Process noise (simulates slippage, unknown disturbances, model inaccuracy).

The IMU drift model reflects the slow change in MPU-6050 offsets [22], which is critical for stable yaw and speed.

$$\begin{aligned} b_{a,k+1} &= b_{a,k} + w_{ba,k} \\ b_{g,k+1} &= b_{g,k} + w_{bg,k} \end{aligned} \tag{3}$$

Where: $b_{a,k}$ - accelerometer offset at step k , which reflects systematic error in acceleration measurement and affects the estimation of linear velocity and position of the robot; $b_{a,k+1}$ - the predicted value of the accelerometer offset at the next time step, used in the state estimation filter; $b_{g,k}$ - gyroscope drift at the step k , which characterizes the systematic error in measuring angular velocity and leads to the accumulation of orientation error; $b_{g,k+1}$ - predicted value of gyroscope offset at the next time step; $w_{ba,k}, w_{bg,k}$ - random walk noise (their dispersion determines the “speed” of drift) for the accelerometer and, accordingly, for the gyroscope.

Sensor models and data fusion using the Extended Kalman Filter (EKF) will be presented in the general form of measurements [23]:

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, \mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, R) \tag{4}$$

Where: \mathbf{z}_k - measurement vector; $h(\cdot)$ – measurement model; \mathbf{v}_k – measurement noise; R - covariance of measurement noise.

The MPU-6050 gyroscope model provides a stable short-term forecast ψ through w , but with drift compensation:

$$z_k^{(g)} = w_k + b_{g,k} + v_k^{(g)} \tag{5}$$

Where: $z_k^{(g)}$ - yaw gyroscope measurement; $v_k^{(g)}$ - gyroscope noise (white).

The MPU-6050 accelerometer model provides correction v (by integrating acceleration) and detection of maneuvers or stops. In reality, the accelerometer is sensitive to vibrations, so its noise is set higher.

$$z_k^{(a)} = a_k^{body} + b_{a,k} + v_k^{(a)} \tag{6}$$

Where: $z_k^{(a)}$ - accelerometer measurement (along the axis of motion); a^{body} - true acceleration in the CS hull; $v_k^{(a)}$ - accelerometer noise.

We describe the Visual-Inertial Odometry (VIO) [24] or Visual Odometry (VO) [25] camera as a “pseudo-measurement” of position and orientation increment, the camera provides a “geometric” correction to the drifting IMU, reducing position error. The most convenient thing in numerical modeling is to set increment measurements:

$$\mathbf{z}_k^{(vo)} = \begin{bmatrix} \Delta x_k^{vo} \\ \Delta y_k^{vo} \\ \Delta \psi_k^{vo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k - x_{k-1} \\ y_k - y_{k-1} \\ \psi_k - \psi_{k-1} \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k^{(vo)} \tag{7}$$

Where: $\mathbf{z}_k^{(vo)}$ - vector of visual odometry measurements at step k , containing estimates of increments in the position and orientation of the robot between two consecutive moments in time;

$\Delta x^{vo}, \Delta y^{vo}, \psi^{vo}$ - estimated by visual odometry, the increase in the robot's coordinates along the axis x and y , and, respectively, the robot's yaw, obtained from the analysis of a sequence of images or VIO; x_k, y_k - coordinates of the robot's position in the global coordinate system at step k ; x_{k-1}, y_{k-1} - coordinates of the robot's position at the previous time step; ψ_k - orientation work in a global coordinate system at a step k ; ψ_{k-1} - orientation work at the previous time step; $\mathbf{v}^{(vo)}$ - VO/VIO noise increases in poor lighting or texture.

The HC-SR04 model [26] describes the distances to the nearest obstacle along the beam, providing reliable close-range safety (stop/detour), even when the camera “does not see” the obstacle due to flickering or glare. Let the ultrasonic beam be directed along ψ_k or with a fixed offset δ :

$$z_k^{(u)} = r(\mathbf{x}_k, \mathcal{M}_k) + v_k^{(u)} \tag{8}$$

Where: $z^{(u)}$ - range measurement; δ - angle of sensor offset relative to robot axis; \mathcal{M}_k - current occupation map; $v^{(u)}$ - ultrasound noise (the model can use Gaussian or mixed noise); $r(\cdot)$ - ray-casting from the position of work in the direction $\psi_k + \delta$ to the first occupied cell of the map \mathcal{M}_k .

The state filter is presented in the standard EKF form, which provides not only a state estimate but also uncertainty P , which then translates into risk limitations for the planner:

- forecast:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \\ P_{k|k-1} &= F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (9)$$

- correction for each sensor:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \\ S_k &= H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \\ K_k &= P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k \mathbf{y}_k \\ P_{k|k} &= (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (10)$$

Where: $\hat{\mathbf{x}}$ - condition assessment; P - covariance of estimation error; $f(\cdot)$ - process model of movement; \mathbf{u} - control $[a, \alpha]$ or $[v, w]$ depending on implementation; $F_k = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$ - Jacobian of the process model; Q_k - process noise covariance; $H_k = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}$ - Jacobian of measurement model; R_k - covariance of measurement noise; K_k - Kalman matrix; \mathbf{y}_k - innovation; S_k - innovation covariance.

Let's build a probabilistic model of the environment map, taking into account uncertainty and dynamics. Employment grid in logarithmic coefficients:

- for each cell c :

$$l_k(c) = \log \frac{p_k(c)}{1 - p_k(c)} \quad (11)$$

- updating:

$$l_k(c) = l_{k-1}(c) + \log \frac{p(z_k|c)}{p(z_k|\neg c)} - l_0(c) \quad (12)$$

- backward step:

$$p_k(c) = \frac{1}{1 + \exp(-l_k(c))} \quad (13)$$

Where: $p_k(c)$ - probability that a cell is occupied; $l_k(c)$ - occupation log-odds; $l_0(c)$ - a priori log-odds; $p(z_k|c)$ - plausibility model of measurement if the cell is occupied; $p(z_k|\neg c)$ - plausibility model of measurement if the cell is free.

Inflation of obstacles taking into account position uncertainty (safety dilation). Let the position error with EKF have covariance $P_{xy}(2 \times 2)$. Let's take the "radius of uncertainty":

$$r = k \sqrt{\lambda_{\max}(P_{xy})} \quad (14)$$

and safe radius:

$$r_{safe} = r_{robot} + r + r_{margin} \quad (15)$$

Where: P_{xy} - covariance submatrix for (x, y) ; λ_{max} - the most significant meaning; k - confidence coefficient (e.g., 2...3 for 95–99%); r_{robot} - robot's radius; r_{margin} - additional reserve for collaboration, people, or map inaccuracies.

Let's describe the dynamic obstacle model as a prediction of the position of moving objects (people/other robots) to assess the risk of collision in the future horizon. For each obstacle, let's introduce a state:

$$\mathbf{o}_k^j = [x_k^j, y_k^j, v_{x,k}^j, v_{y,k}^j]^T \quad (16)$$

- obstacle movement model:

$$\mathbf{o}_{k+1}^j = A\mathbf{o}_k^j + \mathbf{w}_k^j, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Where: \mathbf{o}_{k+1}^j - predicted state of the j -th obstacle at the next time step; A - state transition matrix that implements a uniform linear motion model and describes the relationship between the position and velocity of an obstacle in discrete time; x^j, y^j - spatial coordinates of the obstacle in the plane of motion; v_x^j, v_y^j - projections of the linear velocity of the obstacle along the axes x and y ; \mathbf{w}_k^j - vector of process noise that models uncertainty and unpredictable changes in obstacle movement (maneuvers, stops, changes in direction) that are not described by a deterministic model.

Observation of obstacles from the camera (2D detection \rightarrow position), i.e., the camera provides tracks and/or detection, from which we evaluate moving objects in the working area of the mobile robot. We suggest using direct measurement of the obstacle's position. Direct measurement of the obstacle's position is a method of observation in which the coordinates of a moving obstacle are determined directly in the surrounding space based on sensor data (e.g., camera or lidar) without the need to integrate velocities or accelerations. In this case, the measured value immediately corresponds to the position of the object in the global or local coordinate system and is used to correct its state in the estimation filters.

$$\mathbf{z}_k^j = \begin{bmatrix} x_k^j \\ y_k^j \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k^j \quad (18)$$

Where: \mathbf{v}^j - measurement noise, depends on distance, occlusions, FPS.

We consider the collision risk as a random variable of the distance to obstacles. Let the predicted position of the robot $\mathbf{p}_k = [x_k, y_k]^T$ have covariance P_{xy} , and the position of the obstacle \mathbf{p}_k^j have covariance P_{xy}^j . Consider the relative vector:

$$\mathbf{d}_k^j = \mathbf{p}_k - \mathbf{p}_k^j \quad (19)$$

Where: \mathbf{d}_k^j - the vector of relative position between the mobile robot and the j -th obstacle at step k , which is used to estimate geometric proximity and collision probability; \mathbf{p}_k - the position vector of the mobile robot in the global coordinate system at step k , which is determined based on the fusion of sensor data and has associated uncertainty; \mathbf{p}_k^j - the position vector of the j -th obstacle in the global coordinate system at step k , obtained from sensor measurements or models for tracking moving objects and also characterized by estimation uncertainty.

Let us introduce a randomness constraint on safe separation to guarantee safety with a given probability:

$$\mathbb{P}(\|\mathbf{d}_k^j\| \geq r_{safe}) \geq 1 - \epsilon \quad (20)$$

Where: $\mathbb{P}(\cdot)$ - probability operator reflecting the stochastic nature of estimates of the position of the robot and obstacles; $\|\mathbf{d}_k^j\|$ - Euclidean norm of the relative position vector between the robot and the j -th obstacle at step k ,

which corresponds to the actual geometric distance between them; r_{safe} - safe radius, which determines the minimum permissible distance between the robot and the obstacle, taking into account the robot's dimensions; ϵ - acceptable collision risk level, which sets the maximum probability of violating the safe distance and reflects the compromise between safety and maneuverability; $1 - \epsilon$ - the minimum acceptable probability of maintaining a safe distance that ensures the necessary level of reliability and safety of mobile robot movement in an uncertain dynamic environment.

Let us introduce a cost function that makes it possible to determine a formal criterion for selecting the optimal trajectory of a mobile robot and is used to quantitatively evaluate all possible control options. It is necessary to reconcile the achievement of the target position with safety requirements, smoothness of movement, and dynamic constraints, allowing us to choose a solution that minimizes the risk of collisions and ensures the effective movement of the robot in an uncertain dynamic environment. We plan the trajectory $\pi = \{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}\}$ on the horizon N . The risk-oriented value model looks like this:

$$J(\pi) = \sum_{i=1}^N (w_g \|\mathbf{p}_{k+1} - \mathbf{p}_{goal}\|^2 + w_u \|\mathbf{u}_{k+i-1}\|^2 + w_{\Delta u} \|\mathbf{u}_{k+i-1} - \mathbf{u}_{k+i-2}\|^2 + w_m C_{map}(\mathbf{p}_{k+i}) + w_d C_{dyn}(\mathbf{p}_{k+i})) \quad (21)$$

Where: $J(\pi)$ - total cost of the trajectory π , which quantitatively assesses its feasibility and is used to select the optimal direction of movement; π - sequence of control actions of the robot on the planning horizon; N - planning horizon, which determines the number of future steps at which the quality of the trajectory is assessed; i - the prediction step index within the planning horizon; \mathbf{p}_{k+1} - the predicted position of the mobile robot at step $k + i$; \mathbf{p}_{goal} - the goal position of the robot in the global coordinate system; w_g - the weight coefficient, which determines the importance of minimizing the distance to the target and stimulates movement in the direction of the specified goal; \mathbf{u}_{k+i-1} - robot control vector at step $k + i - 1$ (linear and angular velocity or corresponding acceleration); w_u - weight coefficient that limits the magnitude of control actions and prevents overly aggressive movement; \mathbf{u}_{k+i-2} - control at the previous step, used to evaluate control changes over time; $w_{\Delta u}$ - a weighting coefficient that is responsible for the smoothness of movement and reduces sharp changes in control signals; $C_{map}(\mathbf{p}_{k+i})$ - a penalty function that reflects the risk of collision with static obstacles based on a probabilistic map of the environment; w_m - a weighting coefficient that determines the priority level of avoiding static obstacles; $C_{dyn}(\mathbf{p}_{k+i})$ - a penalty function associated with the risk of collision with dynamic obstacles (people or other moving objects); w_d - a weighting coefficient that sets the importance of safe interaction with the dynamic environment in collaborative scenarios.

Let's describe the penalty as very expensive trajectories passing through "probably occupied" areas. Let's take the probability of occupancy at a point (from cell interpolation):

$$C_{map}(\mathbf{p}) = -\log(1 - p_{occ}(\mathbf{p}) + \delta_p) \quad (22)$$

Where: $C_{map}(\mathbf{p})$ - the penalty function value of the map, which reflects the risk level of the robot moving through a point \mathbf{p} and is used in the cost function to avoid dangerous areas; \mathbf{p} - the position of the mobile robot in space (two-dimensional coordinates in the global coordinate system), for which the risk of collision with static obstacles is assessed; $p_{occ}(\mathbf{p})$ - the probability of space occupancy at point \mathbf{p} , obtained from a probability map based on sensor data; $1 - p_{occ}(\mathbf{p})$ - the probability that the corresponding point in space is free for the robot to move; δ_p - a small additional regularization parameter that prevents logarithmic singularity at $p_{occ}(\mathbf{p}) \rightarrow 1$ and ensures numerical stability of the calculations.

Let's describe the penalty for dynamic obstacles to make trajectories that violate probabilistic safety impossible (or very expensive):

$$C_{dyn}(\mathbf{p}_{k+i}) = \sum_j \phi \left(\left| \mu(\mathbf{p}_{k+i} - \mathbf{p}_{k+1}^j) \right| - r_{safe} - \eta_\epsilon \sqrt{\lambda_{max}(\sum_{k+i}^j l)} \right) \quad (23)$$

Where: $C_{dyn}(\mathbf{p}_{k+i})$ - a dynamic safety penalty function that quantitatively assesses the risk of a mobile robot

colliding with moving obstacles at a predicted point on its trajectory; \mathbf{p}_{k+i} - predicted position of the mobile robot at the step $k + i$ of the planning horizon; \mathbf{p}_{k+i}^j - predicted position of the j -th dynamic obstacle at step $k + i$; $\mu(\mathbf{p}_{k+i} - \mathbf{p}_{k+i}^j)$ - mathematical expectation of the relative position vector between the robot and the j -th obstacle, taking into account the stochastic estimation of their states; $\|\mu(\cdot)\|$ - Euclidean norm of the mean value of the relative vector corresponding to the expected distance between the robot and the obstacle; r_{safe} - safe radius, which determines the minimum permissible distance between the robot and a dynamic obstacle, taking into account the dimensions and requirements of collaborative safety; η_ϵ - reliability coefficient associated with a specified acceptable level of risk ϵ , which scales the impact of uncertainty on the safety zone; Σ_{k+i}^j - total covariance matrix of relative robot position and j -th obstacle at stage $k + i$ (where $l = 1$); $\sqrt{\lambda_{max}(\Sigma_{k+i}^j)}$ - quantitative measure of spatial uncertainty of mutual position; $\phi(\cdot)$ - A barrier or penalty function that sharply increases the value when approaching a dangerous zone and makes violations of safety conditions unacceptable from an optimization point of view.

An example of a barrier function:

$$\phi(s) = \begin{cases} \frac{1}{(s + \delta_s)^2}, & s > 0 \\ +\infty, & s \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

As a decision-making principle, we will choose the Risk-Aware Model Predictive Control (Risk-Aware MPC) method [27-29], in which the control of a mobile robot is formed by solving an optimization problem on a finite prediction horizon, taking into account the dynamics of the robot, control constraints, and probabilistic safety conditions. At each time step, possible motion trajectories are predicted, the risk of collision is assessed, taking into account the uncertainty of the state and environment, after which only the first control action is performed with subsequent updating of the estimates. This approach was chosen for Python modeling because it is easy to implement numerically, integrates naturally with probabilistic models and state filters, and allows flexible changes to safety and optimality criteria without losing model generality. As a result, the optimization problem at each step will be as follows:

$$\min_{\mathbf{u}_{k:k+N-1}} J(\pi) \quad (25)$$

at conditions:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+i+1} &= f(\mathbf{x}_{k+i}, \mathbf{u}_{k+i}) \\ \mathbf{u}_{min} &\leq \mathbf{u}_{k+i} \leq \mathbf{u}_{max} \\ \mathbb{P}(\text{collision at } k+i) &\leq \epsilon \end{aligned} \quad (26)$$

Where: \mathbf{x}_{k+i} - the state vector of the mobile robot at a step $k + i$, which describes its position, orientation, and dynamic characteristics; \mathbf{x}_{k+i+1} - the predicted state of the robot at the next time step of the planning horizon; $f(\cdot)$ - the robot's motion model, which determines the evolution of its state over time depending on the current state and applied control; \mathbf{u}_{k+i} - the robot's control vector at the step $k + i$ (speed or acceleration), which is an optimization variable; \mathbf{u}_{min} - the lower control limit, which reflects the physical and operational limitations of the robot's drives; \mathbf{u}_{max} - upper control limit, which limits the maximum permissible values of control actions; $\mathbb{P}(\text{collision at } k+i)$ - probability of collision of a mobile robot with obstacles at the planning horizon step $k + i$; ϵ - permissible collision risk level, which sets the maximum probability of safety conditions being violated.

Together, these 26 conditions ensure the physical feasibility of the robot's movement and guarantee compliance with the specified safety level in an uncertain dynamic environment.

4. Numerical modeling and analysis of the results obtained

The purpose of this experiment is to numerically verify the effectiveness of the risk-aware decision-making method (Risk-Aware MPC) for constructing the motion trajectories of a collaborative robot in an uncertain dynamic environment using VO/VIO camera sensors, MPU-6050 (IMU), and HC-SR04. The task is to ensure the safe movement of the robot from the initial state $(x_0, y_0, \psi_0) = (1.0\text{m}, 1.0\text{m}, 30^\circ)$ to the target $(x_g, y_g) = (9.0\text{m}, 9.0\text{m})$ in an environment of

size $10 \times 10\text{m}$ with a map discretization of 0.1 m/cell. To model localization uncertainty, an EKF with a starting state estimate $(x, y, \psi) \approx (1.10\text{m}, 0.95\text{m}, 30^\circ + 0.08\text{rad})$ and initial covariance $P_0 = \text{diag}(0.20^2, 0.20^2, (10^\circ)^2, 0.30^2, 0.30^2, 0.20^2, 0.10^2)$ is used. The input data of the environment are static obstacles in the form of circles with centers and radii $(3.0, 5.5, 0.55), (6.2, 4.0, 0.65), (6.8, 7.6, 0.55), (4.5, 2.5, 0.55)\text{m}$ as well as two dynamic obstacles with states $[x, y, v_x, v_y] = [2.0, 8.5, 0.45, -0.15]$ та $[8.5, 2.0, -0.25, 0.35]$ and effective radius 0.25m. The time parameters of the model are set as $\Delta t = 0.1\text{s}$, duration $T = 28\text{s}$ (280 steps), planning horizon MPC $N = 16$ and the number of candidate controls per step $n_{\text{samples}} = 240$. Restrictions on control are defined as $v \in [0, 0.8]$ m/s and $w \in [-1.2, 1.2]$ rad/s, and the risk-oriented safety zone is formed with parameters $r_{\text{robot}} = 0.22\text{m}$, $r_{\text{margin}} = 0.22\text{m}$, $k = 2.5$, $\eta_\epsilon = 2.0$ at the conceptual level of risk $\epsilon = 0.03$ and uncertainty of obstacle detection $\sigma_{\text{obs}} = 0.18\text{m}$. The following noise statistics are specified for the sensors: for the gyroscope $R_g = (0.03)^2$ (rad/s)², for VO increments $R_{\text{vo}} = \text{diag}(0.04^2, 0.04^2, (2^\circ)^2)$, and ultrasonic measurement has a range $r_{\text{max}} = 3.0\text{m}$ and noise $\sigma_u \approx 0.02\text{m}$. The criterion of optimality is determined by the weights of the cost function $w_g = 6.0$, $w_u = 0.15$, $w_{\Delta u} = 0.35$, $w_m = 2.0$, $w_d = 6.0$, which provides a compromise between achieving the goal, energy consumption, smooth control, and penalties for the risk of collision with static and dynamic obstacles. Thus, the given numerical input data completely determines the experiment for evaluating the goal reachability, safety margin, localization accuracy, and stability of Risk-Aware MPC in Python simulation.

Description of hardware for conducting the study: Microsoft Surface Pro 9 with the following parameters: CPU Deca-core Intel Core i7-1255U (1.7 – 4.7 GHz), GPU Iris Xe Graphics, RAM 16Gb, SSD 512.

Software: Windows 11 Pro (version 24H2) OS type 64-bit operating system, processor based on x64 architecture.

Development environment for the program for numerous modeling PyCharm 2025.1.1.1 and programming language Python 3.13.7

The results of numerical modeling of the decision-making method for constructing trajectories of movement in an uncertain dynamic environment for a collaborative mobile robot are presented in Figures 1-6.

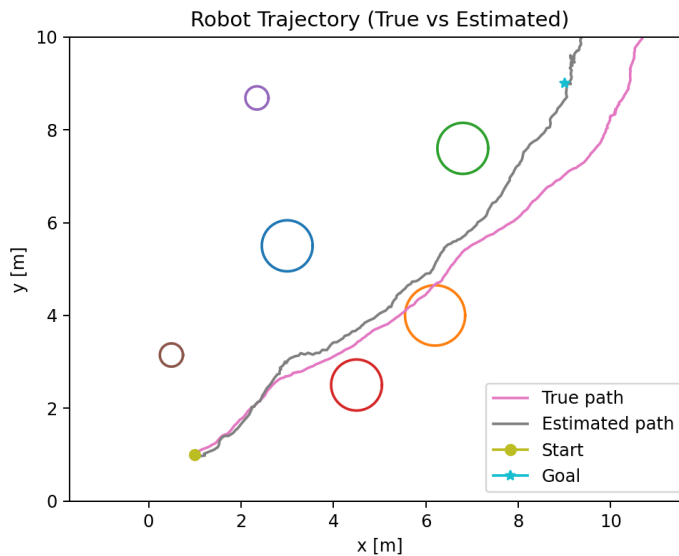


Figure 1- Robot Trajectory (True vs Estimated)

The Robot Trajectory (True vs Estimated) graph (Fig. 1) shows that the estimated path generally reproduces the shape of the true path and practically coincides with it in the initial and middle sections, which indicates the correct operation of sensor fusion and motion prediction. After passing the middle of the route, the discrepancy gradually increases, and near the finish section, there is a noticeable systematic shift in the estimate relative to the true path of approximately 0.5–1.0 m, which is a typical manifestation of the accumulation of localization errors in conditions of uncertainty and dynamics. At the same time, both trajectories remain consistent with the global direction of movement towards the target and demonstrate safe passage between obstacles without sharp maneuvers, i.e., planning is stable, and the estimation error mainly affects the accuracy of the final positioning rather than the overall reachability of the route.

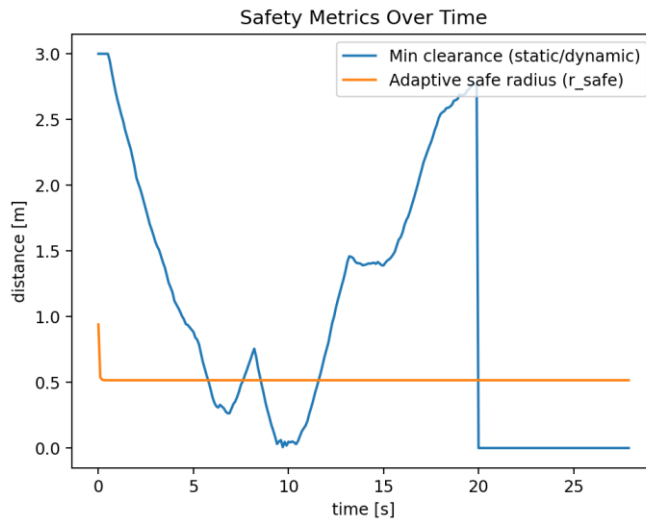


Figure 2 - Safety Metrics Over Time

The Safety Metrics Over Time graph (Fig. 2) shows that the minimum clearance to static and dynamic obstacles varies widely, from approximately 0 to 3 m, reaching its lowest values in the middle of the trajectory, where the robot passes through the densest area of the environment. The adaptive safety radius r_{safe} is maintained at an almost constant level of about 0.5 m, which indicates a stable assessment of localization uncertainty and the correct operation of the risk-oriented safety mechanism. For most of the time interval, the minimum clearance exceeds r_{safe} i.e., the conditions of probabilistic safety are met, while short-term approaches to the limit values reflect forced maneuvers in a confined space. The sharp drop in clearance at the end of the simulation corresponds to the completion of movement in the vicinity of the target or contact with the map boundary and does not indicate instability of the planning algorithm, since the safety margin is generally maintained during the active phase of movement.

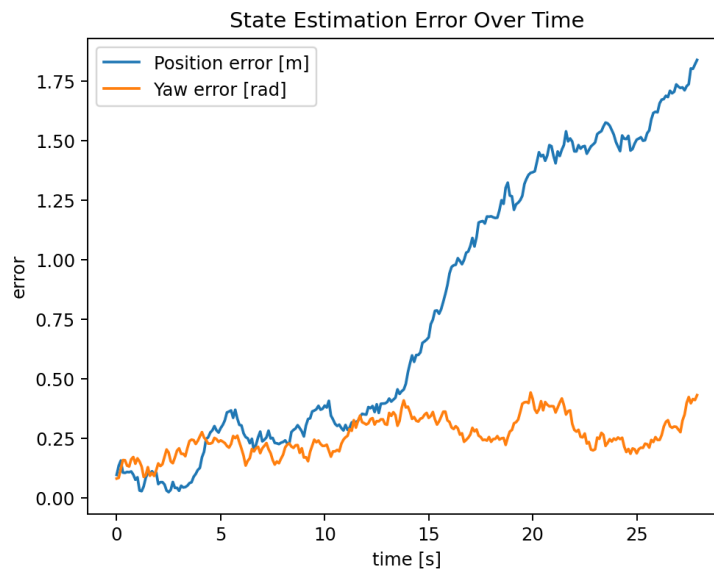


Figure 3 - State Estimation Error Over Time

The State Estimation Error Over Time graph (Fig. 3) shows a gradual increase in position estimation error from initial values of around 0.1–0.2 m to approximately 1.8–1.9 m at the end of the simulation, which quantitatively indicates the accumulation of drift during prolonged movement in a dynamic environment. At the same time, the course orientation error remains significantly smaller and fluctuates within approximately 0.2–0.45 rad without monotonic growth, which indicates effective yaw correction due to IMU and visual odometry. Qualitatively, this means that the sensor fusion system stably maintains the robot's orientation, while the main source of inaccuracy is related to the gradual degradation of positional estimation. Despite the increase in positional error, its magnitude remains acceptable for the global planning task and does not lead to the loss of decision-making algorithm performance.

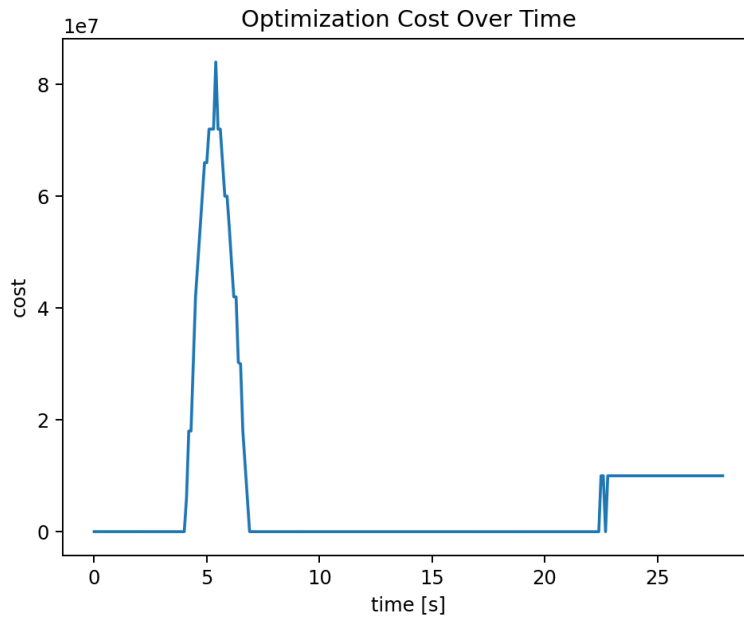


Figure 4 - Optimization Cost Over Time

The Optimization Cost Over Time graph (Fig. 4) shows a sharp increase in the optimization function value to the order of $8 \cdot 10^7$ at the early stage of movement, which numerically indicates the presence of a complex environment configuration with high penalties for risk and proximity to obstacles. After overcoming this critical section, the cost quickly decreases to almost zero, indicating that the robot has entered a freer zone and the planning process has stabilized. At the end of the simulation, there is a repeated increase in cost to a level of about 10^7 , which qualitatively corresponds to the convergence with the target area or the boundary conditions of the map, where the goal achievement time dominates. In general, this dynamic confirms that Risk-Aware MPC correctly identifies dangerous situations and adaptively changes control, concentrating high values of the cost function only in critical phases of motion.

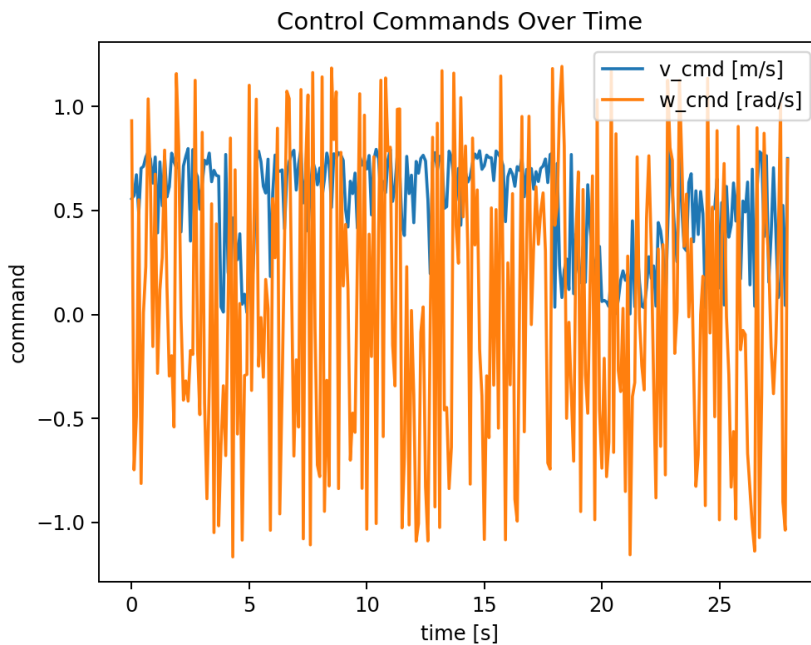


Figure 5 - Control Commands Over Time

The Control Commands Over Time graph (Fig. 5) shows that the linear velocity is mainly maintained in the range of approximately 0.4–0.8 m/s without sharp jumps, which numerically indicates the stable forward motion of the robot along the trajectory. The angular velocity changes much more intensively and fluctuates within the range of approximately -1.2 – 1.2 rad/s, which qualitatively corresponds to active corrective maneuvers to avoid obstacles and compensate for uncertainty. This difference in control behavior means that Risk-Aware MPC keeps the forward motion as uniform as possible, shifting the main adaptation to rotational maneuvers. Overall, the commands

obtained confirm an adequate compromise between maneuverability and smoothness of motion, which is necessary for safe navigation in a dynamic collaborative environment.

```

=== Risk-Aware MPC Simulation Results ===
Total steps: 280, dt: 0.100 s, horizon N: 16, samples/step: 240
Goal: (9.00, 9.00)
Reached goal: False
Path length: 14.812 m
Final distance to goal (true): 2.688 m
Final distance to goal (estimate): 2.961 m
Min clearance (static/dynamic): 0.000 m
Mean clearance: 0.963 m
Mean position estimation error: 0.782 m
Max position estimation error: 1.839 m
Mean yaw estimation error: 0.260 rad
Max yaw estimation error: 0.443 rad
Risk parameter eps (conceptual): 0.030 (implemented via eta_eps=2.00)
=====

```

Figure 6 – Numerical simulation results

The numerical results obtained (Fig. 6) show that the mobile robot traveled a distance of approximately 14.8 m in 280 simulation steps with a step size of 0.1 s, but did not reach the exact target, maintaining the final distance to it at approximately 2.7 m for the true state and 3.0 m for the estimated state. The average clearance of almost 1.0 m confirms that in most cases the movement took place with a sufficient safety margin, although the minimum value, tending to zero, indicates short-term critical approaches to obstacles or boundaries of the environment. The average position estimation error of 0.78 m and the maximum of approximately 1.84 m quantitatively reflect the accumulation of localization uncertainty during prolonged movement, which directly affected the accuracy of the final positioning. At the same time, the orientation estimation error remains moderate, not exceeding 0.44 rad, which qualitatively confirms the effectiveness of combining IMU and visual odometry for course stabilization. The difference between the true and estimated distance to the target at the end of the movement demonstrates the impact of localization error on the planner's decision-making. Overall, the results show that Risk-Aware MPC provides safe and stable movement in an uncertain dynamic environment, but achieving the target with high accuracy requires additional localization correction or terminal control mechanisms.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest, in particular financial, personal, authorial or any other nature, which could affect the research, as well as the results published in this article.

Funding

Funding was provided within the framework of the implementation of the state theme "Hardware and software complex for detection and neutralization of explosive objects based on intelligent robotic platforms" at the Department of Computer Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering (CITARBI), Kharkiv National University of Radio Electronics.

Conclusions.

The results of the study show that the developed risk-oriented decision-making method based on Risk-Aware MPC ensures stable and safe formation of trajectories of a mobile collaborative robot in an uncertain dynamic environment with incomplete and noisy sensory information. Numerical modeling confirmed the method's ability to adaptively account for the uncertainty of localization and obstacle movement through the integration of EKF, a probabilistic map of the environment, and the prediction of dynamic objects, which allows maintaining an acceptable safety margin throughout the entire movement. The results show that even with the accumulation of positional localization errors, the algorithm does not lose its performance and maintains global route reachability. Analysis of the cost function and control actions showed that the planner correctly identifies critical areas with increased risk and compensates for them through maneuverability without sudden changes in linear velocity. It was found that the main limiting factor for the accuracy of reaching the target is the degradation of the position estimate, which indicates the feasibility of further development of terminal control or improved localization methods. In general, the proposed approach confirms the effectiveness of combining probabilistic modeling and MPC for safe navigation tasks. The developed method can be applied in collaborative robots for industrial logistics, service robotics, autonomous transport platforms in production workshops, as well as in robots that interact with people in dynamic and weakly structured

environments.

Список літератури:

1. Garcés, G., Torres, K., Castañeda, K., Mendoza, S., Peña, C. A., & Sánchez, O. (2026). Human-Robot collaboration in industrialized construction manufacturing 5.0: A bibliometric mapping of smart production research. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-46. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-17340-7>
2. Hammad, M., Ali, H., Hussain, G., Wang, X. (2026). Core Technologies Enabling Industry 5.0. In: *Industry 5.0: The Human-Centric Future of Industry*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-12622-1_3
3. Nevliudov, I. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., Gopejenko, V. ., & Kosenko, V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
4. Model with Neural Network Component for Adaptive Manipulator Control under Variable Load / Amer Abu-Jassar, Mohammad Hamdan, Nowfal Aweisi, Mahmoud Howaidi, V. Yevsieiev, V. Lyashenko // *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. –19(1). – 2026. – P. 855-868. <https://doi.org/10.32403/10.22266/ijies2026.0131.51>
5. Zhang, J., & Fujimura, S. (2026). An innovative meta-heuristic for balancing and scheduling human-robot collaborative assembly lines in Industry 5.0. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 43(1), 117-137. <https://doi.org/10.1080/21681015.2025.2533436>
6. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>
7. Liu, Y., Yi, J., Chi, P., Liao, H., Zhang, Q., & Wang, Z. (2026). Review of trajectory planning for humanoid welding robot manipulators: from fundamentals to industrial applications in intelligent manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02765-4>
8. Zhang, J., Liu, J., Zhou, L., Fang, L., Zhang, K., Zong, H., & Xu, B. (2026). Multiobjective Joint Optimization for Trajectory and Controller Parameters to Enhance Hydraulic Legged Robot Jumping Performance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2025.3645688>
9. Nevliudov, I. ., Omarov, M. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Jabrayilzade, E. . (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. *Advanced Information Systems*, 10(1), 11–20. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.02>
10. Zhang, T., Wang, N., Yang, Y., & Wang, Z. (2026). A generalised system for multi-mobile robot cooperation in smart manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 98, 103139. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103139>
11. Liu, C., Song, J., Tang, D., Wang, L., Zhu, H., & Cai, Q. (2026). From insight to autonomous execution: VLM-enhanced embodied agents towards digital twin-assisted human-robot collaborative assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 98, 103176. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103176>
12. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Artiukh, R. (2025). Mathematical model of adaptive hierarchical high-level control of a three-link collaborative robot-manipulator. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (2(32), 58–68. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.058>
13. Khan, A. T., & Li, S. (2026). Robotic Haircutting Systems: A Survey of Methods, Challenges, and Hair Modeling Insights. *IEEE Journal of Selected Areas in Sensors*. <https://doi.org/10.1109/JSAS.2026.3654480>
14. Sun, T., Wang, B., & Huo, X. (2026). Knowledge-driven automated design of industrial robots: A unified graph-based framework with multi-engine reasoning. *Advanced Engineering Informatics*, 69, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103995>
15. John, A., Cardiff, B., & John, D. (2026). A Survey of Fusion Frameworks and Algorithms for Physiological Monitoring. In *Deep Learning and Signal-Processing Methods for Multisensor Data Fusion: Applications to Ambulatory Health Monitoring* (pp. 9-56). Cham: Springer Nature Switzerland. ISBN 3031967240
16. Yevsieiev, V., & et al. (2024). Data Fusion Research for Collaborative Robots-Manipulators within Industry 5.0. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 125-137.
17. Almuzaini, T. S., & Savkin, A. V. (2026). Trajectory Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Uneven Environments: A Survey of Coverage and Sensor Data Collection Methods. *Future Internet*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/fi18020079>
18. Zhang, J., Jiang, S., Yang, Z., Zhou, Z., & Xing, C. (2026). A Guided Sampling Enhanced Rapidly-Exploring Random Tree Path Planning Algorithm for Robot-Assisted Flexible Needle Insertion. *Annals of Biomedical Engineering*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10439-025-03956-z>
19. Gu, J., & Wang, Y. (2026). A constrained reinforcement learning based approach for cooperative control of multi-UAV in dense obstacle environments. *Science China Technological Sciences*, 69(1), 1120601. <https://doi.org/10.1007/s11431-025-3076-2>

20. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94
21. Hose, H., Brunzema, P., Subhashish, D., & Trimpe, S. (2026). The Mini Wheelbot Dataset: High-Fidelity Data for Robot Learning. arXiv preprint arXiv:2601.11394. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.11394>
22. Chen, W., Ye, P., & Jiang, X. (2026). The application and management of wearable optical sensing technology in precision medical and health monitoring for the elderly. SLAS technology, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.slast.2026.100401>
23. Yang, B., Zhao, Y., Zhao, X., & Peng, M. (2026). High-Accuracy Clock Synchronization Algorithm for LEO Satellites Based on Particle-Enhanced Extended Kalman Filtering. IEEE Transactions on Vehicular Technology. <https://doi.org/10.1109/TVT.2026.3654158>
24. Çintaş, E., & Özyer, B. (2026). A robust fault-tolerant control algorithm for GPS-denied mini quadrotors using PID-TinyMPC and visual-inertial odometry. Control Engineering Practice, 169, 106779. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.106779>
25. Phan, T. D., & Kim, G. W. (2025). Toward Specialized Learning-based Approaches for Visual Odometry: A Comprehensive Survey. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 111(2), 1-32. <https://doi.org/10.1007/s10846-025-02245-0>
26. He, Y. (2025, August). Research for Robot Detection System Based on Low-Cost Distance Sensor HC-SR04. In 2025 IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE) (pp. 745-749). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSECE65727.2025.11256852>
27. Zhou, D., Liang, Z., Fu, Y., Lu, M., Wang, T., Xu, Q., ... & Yang, H. (2026). Risk-aware model predictive control for autonomous vehicle platoons under uncertain cut-in scenarios based on Gaussian mixture models. Chaos, Solitons & Fractals, 207, 117920.
28. Liu, S., & Belta, C. A. (2025). Risk-Aware Adaptive Control Barrier Functions for Safe Control of Nonlinear Systems under Stochastic Uncertainty. arXiv preprint arXiv:2503.19205. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2026.117920>
29. Akella, P., Dixit, A., Ahmadi, M., Lindemann, L., Chapman, M. P., Pappas, G. J., ... & Burdick, J. W. (2025). Risk-aware robotics: Tail risk measures in planning, control, and verification [focus on education]. IEEE Control Systems, 45(4), 46-78. <https://doi.org/10.1109/MCS.2025.3577050>
- 30.

References (transliterated)

1. Garcés, G., Torres, K., Castañeda, K., Mendoza, S., Peña, C. A., & Sánchez, O. (2026). Human-Robot collaboration in industrialized construction manufacturing 5.0: A bibliometric mapping of smart production research. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-46. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-17340-7>
2. Hammad, M., Ali, H., Hussain, G., Wang, X. (2026). Core Technologies Enabling Industry 5.0. In: Industry 5.0: The Human-Centric Future of Industry. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-12622-1_3
3. Nevliudov, I. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., Gopejenko, V. ., & Kosenko, V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. Advanced Information Systems, 9(3), 57-65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
4. Model with Neural Network Component for Adaptive Manipulator Control under Variable Load / Amer Abu-Jassar, Mohammad Hamdan, Nowfal Aweisi, Mahmoud Howaidi, V. Yevsieiev, V. Lyashenko // International Journal of Intelligent Engineering and Systems. -19(1). - 2026. - P. 855-868. <https://doi.org/10.32403/10.22266/ijies2026.0131.51>
5. Zhang, J., & Fujimura, S. (2026). An innovative meta-heuristic for balancing and scheduling human-robot collaborative assembly lines in Industry 5.0. Journal of Industrial and Production Engineering, 43(1), 117-137. <https://doi.org/10.1080/21681015.2025.2533436>
6. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. Radioelectronic and Computer Systems, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>
7. Liu, Y., Yi, J., Chi, P., Liao, H., Zhang, Q., & Wang, Z. (2026). Review of trajectory planning for humanoid welding robot manipulators: from fundamentals to industrial applications in intelligent manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02765-4>
8. Zhang, J., Liu, J., Zhou, L., Fang, L., Zhang, K., Zong, H., & Xu, B. (2026). Multiobjective Joint Optimization for Trajectory and Controller Parameters to Enhance Hydraulic Legged Robot Jumping Performance. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2025.3645688>
9. Nevliudov, I. ., Omarov, M. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Jabrayilzade, E. . (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING

DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. *Advanced Information Systems*, 10(1), 11–20.
<https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.02>

10. Zhang, T., Wang, N., Yang, Y., & Wang, Z. (2026). A generalised system for multi-mobile robot cooperation in smart manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 98, 103139. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103139>
11. Liu, C., Song, J., Tang, D., Wang, L., Zhu, H., & Cai, Q. (2026). From insight to autonomous execution: VLM-enhanced embodied agents towards digital twin-assisted human-robot collaborative assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 98, 103176. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103176>
12. Nevludov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Artiukh, R. (2025). Mathematical model of adaptive hierarchical high-level control of a three-link collaborative robot-manipulator. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (2(32)), 58–68. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.058>
13. Khan, A. T., & Li, S. (2026). Robotic Haircutting Systems: A Survey of Methods, Challenges, and Hair Modeling Insights. *IEEE Journal of Selected Areas in Sensors*. <https://doi.org/10.1109/JSAS.2026.3654480>
14. Sun, T., Wang, B., & Huo, X. (2026). Knowledge-driven automated design of industrial robots: A unified graph-based framework with multi-engine reasoning. *Advanced Engineering Informatics*, 69, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103995>
15. John, A., Cardiff, B., & John, D. (2026). A Survey of Fusion Frameworks and Algorithms for Physiological Monitoring. In *Deep Learning and Signal-Processing Methods for Multisensor Data Fusion: Applications to Ambulatory Health Monitoring* (pp. 9-56). Cham: Springer Nature Switzerland. ISBN 3031967240
16. Yevsieiev, V., & et al. (2024). Data Fusion Research for Collaborative Robots-Manipulators within Industry 5.0. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 125-137.
17. Almuzaini, T. S., & Savkin, A. V. (2026). Trajectory Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Uneven Environments: A Survey of Coverage and Sensor Data Collection Methods. *Future Internet*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/fi18020079>
18. Zhang, J., Jiang, S., Yang, Z., Zhou, Z., & Xing, C. (2026). A Guided Sampling Enhanced Rapidly-Exploring Random Tree Path Planning Algorithm for Robot-Assisted Flexible Needle Insertion. *Annals of Biomedical Engineering*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10439-025-03956-z>
19. Gu, J., & Wang, Y. (2026). A constrained reinforcement learning based approach for cooperative control of multi-UAV in dense obstacle environments. *Science China Technological Sciences*, 69(1), 1120601. <https://doi.org/10.1007/s11431-025-3076-2>
20. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94
21. Hose, H., Brunzema, P., Subhashish, D., & Trimpe, S. (2026). The Mini Wheelbot Dataset: High-Fidelity Data for Robot Learning. *arXiv preprint arXiv:2601.11394*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.11394>
22. Chen, W., Ye, P., & Jiang, X. (2026). The application and management of wearable optical sensing technology in precision medical and health monitoring for the elderly. *SLAS technology*, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.slant.2026.100401>
23. Yang, B., Zhao, Y., Zhao, X., & Peng, M. (2026). High-Accuracy Clock Synchronization Algorithm for LEO Satellites Based on Particle-Enhanced Extended Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2026.3654158>
24. Çintaş, E., & Özyer, B. (2026). A robust fault-tolerant control algorithm for GPS-denied mini quadrotors using PID-TinyMPC and visual-inertial odometry. *Control Engineering Practice*, 169, 106779. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.106779>
25. Phan, T. D., & Kim, G. W. (2025). Toward Specialized Learning-based Approaches for Visual Odometry: A Comprehensive Survey. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111(2), 1-32. <https://doi.org/10.1007/s10846-025-02245-0>
26. He, Y. (2025, August). Research for Robot Detection System Based on Low-Cost Distance Sensor HC-SR04. In *2025 IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE)* (pp. 745-749). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSECE65727.2025.11256852>
27. Zhou, D., Liang, Z., Fu, Y., Lu, M., Wang, T., Xu, Q., ... & Yang, H. (2026). Risk-aware model predictive control for autonomous vehicle platoons under uncertain cut-in scenarios based on Gaussian mixture models. *Chaos, Solitons & Fractals*, 207, 117920.
28. Liu, S., & Belta, C. A. (2025). Risk-Aware Adaptive Control Barrier Functions for Safe Control of Nonlinear Systems under Stochastic Uncertainty. *arXiv preprint arXiv:2503.19205*. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2026.117920>
29. Akella, P., Dixit, A., Ahmadi, M., Lindemann, L., Chapman, M. P., Pappas, G. J., ... & Burdick, J. W. (2025). Risk-aware robotics: Tail risk measures in planning, control, and verification [focus on education]. *IEEE Control Systems*,

About the Authors / Відомості про авторів

Igor Nevliudov (Невлюдов Ігор Шакирович) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216434058>.

Murad Omarov (Омаров Мурад Анвер огли) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector on International Cooperation, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: murad.omarov@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4842-4972>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55659255500>.

Vladyslav Yevsieiev (Євсєєв Владислав В'ячеславович) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7085>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190568855>.

Elgun Jabrayilzade (Джабраїлзаде Ельгун Айаз огли) – PhD student, Department of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering,, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: elgun1999@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2932-4976>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221814450>.

V. YEVSIEIEV, S. MAKSYMOVA, N. STARODUBCEV, O. CHALA, D. GURIN

MATHEMATICAL MODELS OF MOBILE ROBOTS IN THE DIGITAL TWIN CONCEPT: COMPARATIVE ANALYSIS AND RESEARCH OF USAGE TRENDS

Abstract: The article explores mathematical models of mobile robots in the Digital Twin concept, taking into account current trends in the development of robotic systems and Industry 5.0. **The purpose of the study** is to conduct a comprehensive qualitative, numerical, and comparative analysis of kinematic models of mobile robots and determine the patterns of their use in digital twins and scientific publications. **The object of research** is the process of functioning of mobile robots in a dynamic environment in conditions of digital representation of their behavior. The subject of research is mathematical models of motion, in particular Unicycle, Differential Drive, Bicycle, Omni-directional and Ackermann, as well as methods of their application in navigation and control systems. The scientific novelty of the work lies in the systematization of approaches to modeling the motion of mobile robots in the SE(2) state space, conducting a comprehensive comparative analysis of their characteristics, and conducting the first-ever study of trends in the use of these models based on data from the international scientometric database Scopus for 2022–2025. The results obtained showed that the Differential Drive model occupies a dominant position among the studied models, demonstrating the highest dynamics of the growth of the number of publications, which is due to its optimal combination of computational simplicity and physical adequacy to real robotic platforms, while other models have a narrower specialization or increased complexity of implementation. The analysis confirmed that the choice of a mathematical model for a digital twin is determined by a compromise between the accuracy of reproduction, the complexity of calculations and the requirements for control and navigation systems. The results obtained can be used in the development of digital twins of mobile robots, autonomous navigation systems, multi-robot systems and intelligent manufacturing platforms.

Ключові слова: Digital Twin, mobile robots, kinematic models, Differential Drive, Unicycle model, Bicycle model, Omni-directional model, Ackermann model, SE(2), Scopus analysis, Industry 5.0

В. ЄВСЬЄВ, С. МАКСИМОВА, Н. СТАРОДУБЦЕВ, О. ЧАЛА, Д. ГУРІН МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ У КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ

Анотація: У статті досліджуються математичні моделі мобільних роботів у концепції цифрового двійника з урахуванням сучасних тенденцій розвитку робототехнічних систем та Індустрії 5.0. Метою дослідження є проведення комплексного якісного, числового та порівняльного аналізу кінематичних моделей мобільних роботів та визначення закономірностей їх використання в цифрових двійниках та наукових публікаціях. Об'єктом дослідження є процес функціонування мобільних роботів у динамічному середовищі в умовах цифрового представлення їхньої поведінки. Предметом дослідження є математичні моделі руху, зокрема одноколісної, диференціальної, велосипедної, всенаправленої та Аккермана, а також методи їх застосування в системах навігації та управління. Наукова новизна роботи полягає в систематизації підходів до моделювання руху мобільних роботів у просторі станів SE(2), проведенні комплексного порівняльного аналізу їх характеристик та проведенні першого в історії дослідження тенденцій використання цих моделей на основі даних міжнародної наукометричної бази даних Scopus за 2022–2025 роки. Отримані результати показали, що модель Differential Drive займає домінуюче положення серед досліджуваних моделей, демонструючи найвищу динаміку зростання кількості публікацій, що зумовлено її оптимальним поєднанням обчислювальної простоти та фізичної адекватності реальним роботизованим платформам, тоді як інші моделі мають вужчу спеціалізацію або підвищену складність реалізації. Аналіз підтвердив, що вибір математичної моделі для цифрового двійника визначається компромісом між точністю відтворення, складністю розрахунків та вимогами до систем керування та навігації. Отримані результати можуть бути використані при розробці цифрових двійників мобільних роботів, автономних навігаційних систем, багатороботних систем та інтелектуальних виробничих платформ.

Ключові слова: цифровий двійник, мобільні роботи, кінематичні моделі, диференціальний привід, модель одноколісного велосипеда, модель велосипеда, всенаправлена модель, модель Аккермана, SE(2), аналіз Scopus, Індустрія 5.0

Introduction.

In the current conditions of development of intelligent production systems and the concept of Industry 5.0, the use of digital twin technology for modeling, monitoring and optimization of mobile robotic systems is of particular relevance [1,2]. The use of digital twins allows creating virtual models of robots that reproduce their behavior in a real environment and provide the opportunity to study control algorithms, navigation and interaction with a dynamic environment without conducting complex full-scale experiments [3,4]. The basis for building such systems are mathematical models of mobile robots, in particular kinematic models of the Unicycle [5], Differential Drive [6], Bicycle [7], Omni-directional [8] and Ackermann [9] types, which determine the structure of movement, control parameters and accuracy of digital representation of a physical object. At the same time, there is a significant increase in the number of studies devoted to the use of these models in the tasks of creating digital twins, autonomous navigation and collaborative robotics [10-12]. However, the issue of comparative analysis of the advantages and limitations of these mathematical models, as well as the study of trends in their use in modern scientific publications, remains insufficiently systematized. In this regard, it is relevant to conduct a comprehensive analysis of mathematical models of mobile robots in Digital Twin systems and study the dynamics of their use in scientific publications in recent years.

© V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Starodubcev, O. Chala, D. Gurin. 2025

Recent research and publications analysis.

The analysis of the above publications shows that modern research in the field of mobile robotics is focused mainly on reviews of kinematic structures, approaches to trajectory planning, generalization of motion models and comparison of specialized chassis architectures. At the same time, it is important not only to describe existing approaches, but also to assess their suitability for building digital twins and comparative analysis of trends in the use of models. That is why the above sources should be considered as a scientific basis that confirms the relevance of the chosen direction. In the article Tagliavini Luigi and Colucci Giuseppe, et al., a review of the current state of wheeled mobile robots is proposed and a kinematic comparison of three omnidirectional movement strategies is performed, which makes it possible to

assess the constructive and kinematic advantages of various omnidirectional platforms [13]. This approach cannot be directly used within the framework of the study of digital twins of basic motion models, since it focuses only on a narrow class of omni-directional systems and does not cover the comparison of Unicycle, Differential Drive, Bicycle and Ackermann in a single analytical framework.

In the work of Sarcinelli-Filho Marcos and Carelli Ricardo, a generalized consideration of kinematic models of ground and air robots is proposed, which makes it possible to form a theoretical basis for describing the motion of robotic systems [14]. Such an approach cannot be used as a complete solution, since it is mainly of an educational and theoretical nature and does not contain a comparative analysis of the trends in the application of models in the Digital Twin concept.

In the study of Poduval Divya R. and Rajalakshmy P., a review of autonomous mobile robots with a focus on the general principles of navigation, sensors and autonomy is proposed, which makes it possible to determine the place of mobile platforms in modern intelligent systems [15]. This solution cannot be directly used, since it does not perform a deep analysis of mathematical kinematic models in the SE(2) state space and their suitability for building digital twins.

In the article by Alexa Ovidiu and Ciobotaru Tudor, et al., a thorough review of mathematical models for evaluating the kinematics and dynamics of wheeled and tracked unmanned ground platforms is proposed, which makes it possible to trace the evolution of methods for describing the motion of real robots [16]. Such an approach cannot be directly used as the basis of this study, since it is focused on a much wider class of platforms, including tracked ones, and does not form a specialized comparison of the basic kinematic models of mobile robots in the context of Digital Twin.

In the paper by Pantoja-García José S. and Rodríguez-Molina Arturo, et al., a generalized kinematic model for heterogeneous architectures of wheeled mobile robots is proposed, which makes it possible to unify the description of different types of chassis within a single formalism [17]. The proposed approach cannot be used as a complete alternative, since its main emphasis is on mathematical unification, and not on qualitative, numerical and bibliometric comparison of specific models in the practice of digital twins.

In the study by Simerean Andreea C. and Tătar Marius O., a systematic review of tetrahedral mobile robots is proposed, which makes it possible to assess the prospects of non-traditional configurations of mobile platforms [18]. This solution cannot be used, since the study is devoted to highly specialized robot morphology and does not allow for a universal comparative analysis of classical kinematic models, which are most often used in Digital Twin.

In the article Kadar Ferenc and Tătar Marius O. a review of mobile robots with reconfigurable whegs-wheel modules is proposed, which makes it possible to analyze hybrid approaches to locomotion in complex conditions of movement [19]. This approach cannot be directly applied within the framework of the presented study, since it concerns specialized mechanisms of movement and does not provide a comparison of the basic models Unicycle, Differential Drive, Bicycle, Omni-directional and Ackermann according to the criteria of a digital twin.

In the paper Badamasi Muhammad A. and Kabir Isah K., and others a review of classical and heuristic methods of trajectory planning of autonomous mobile robots is investigated, which makes it possible to systematize algorithms for building routes in complex environments [20]. Such a method cannot be used, since it describes mainly planning algorithms, and not mathematical kinematic models of movement, which are the primary basis for the formation of a digital twin of a mobile platform.

In the study by Xia Tao and Li Dong, et al., a review of trajectory planning methods for many mobile robots is proposed, which makes it possible to evaluate the features of coordination, conflict avoidance and collective movement in multi-robot systems [21]. This approach cannot be directly used for the purposes of this study, since it focuses on the problem of multi-robot planning, and not on the fundamental comparison of kinematic models that determine the structure of the digital twin of a single mobile platform.

In the paper by Zhang Zhuo and Wang Zexing, and Zhang Xuping, a kinematic analysis and comparative evaluation of a new four-wheeled omnidirectional mobile robot with redundant drive and trajectory tracking confirmation is proposed, which makes it possible to evaluate the advantages of the new design in terms of controllability and movement accuracy [22]. The proposed solution cannot be used as a universal basis, since it is dedicated to a separate new platform and does not solve the problem of a broad comparative analysis of basic mathematical models of mobile robots and trends in their use in the international scientific space.

In general, it can be stated that all the publications considered form an important scientific foundation for the study of mobile robotics, but each of them highlights only a separate aspect of the problem: specialized chassis types, generalized kinematic formalisms, navigation reviews or planning algorithms. That is why the need for a comprehensive study that combines qualitative, numerical and comparative analysis of basic mathematical models of mobile robots with the study of trends in their use in the Digital Twin concept remains relevant, which justifies the necessity and scientific timeliness of the research performed in the manuscript.

The purpose of the research is to conduct a comprehensive qualitative, numerical and comparative analysis of kinematic models of mobile robots and determine the patterns of their use in digital twins and scientific publications..

Main material presentation.

In the problems of mobile platforms numerical modeling and their digital twins construction, various models of state space representation are used, which differ in the level of detail, consideration of physical effects and type of motion

description. The most basic is the configuration space Special Euclidean Group in 2D (SE(2)) [23], where the state is given by the coordinates of position and orientation, which is suitable for kinematic models such as Unicycle or Differential Drive and is widely used in trajectory planning problems. An extension of this approach is the phase space of states, in which velocities and sometimes accelerations are added to the coordinates, which allows taking into account the dynamics of the system and using optimal control methods such as Model Predictive Control (MPC) or Linear Quadratic Regulator (LQR) [24,25]. To more accurately reflect real conditions, dynamic state models are used, including forces, moments, mass-inertial parameters and interaction with the environment, which is especially important for high-speed or loaded platforms. In navigation tasks in complex environments, an extended state with sensory variables is also used, which includes estimates of the position of obstacles, sensor states, or uncertainty parameters, which is typical for Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [26] and systems using Extended Kalman Filter (EKF) [27] or Unscented Kalman Filter (UKF). In addition, stochastic and probabilistic representations of the state space are used in modern research, where the state is described not by point values, but by probability distributions, which allows taking into account measurement noise and environmental uncertainty [29,30]. Thus, the choice of a state space model is determined by the balance between computational complexity and the required accuracy of the digital twin, as well as the specifics of the tasks of control, navigation, and interaction of a mobile robot with a dynamic environment.

The state space SE(2) in numerical modeling tasks of digital twins of mobile robots defines the complete configuration of the platform on the plane as a combination of its position and orientation and is given by the state vector $q = [x, y, \theta]^T$, where (x, y) - Cartesian coordinates, and θ - angle of rotation relative to the global coordinate system [31]. From a mathematical point of view, this is a group of rigid motions that combines translations and rotations, and it is this structure that allows us to adequately reflect the kinematics of mobile platform motion in a digital twin.

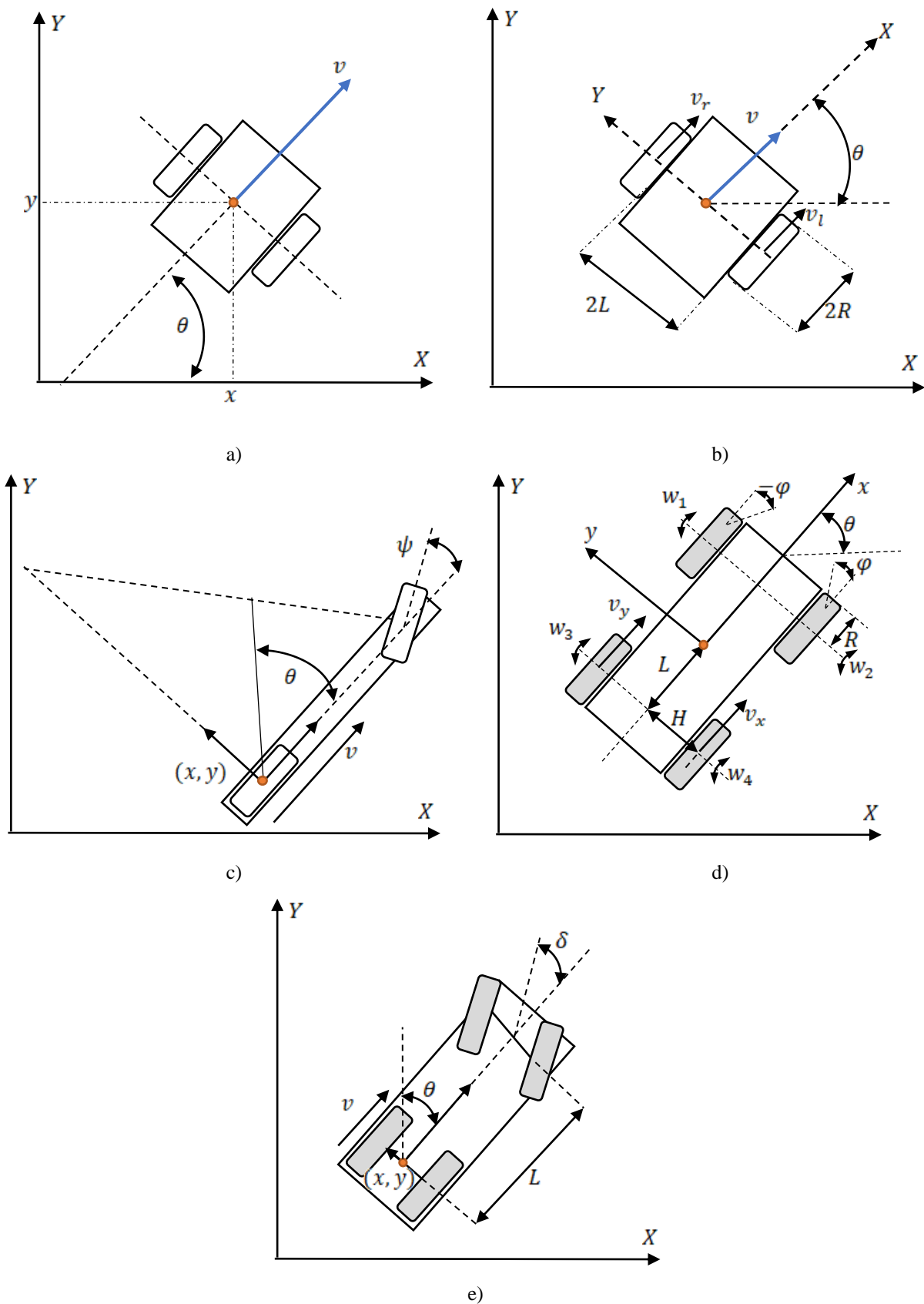
Table 1 shows a comparison of the basic mathematical equations of kinematics for mobile robot models that are most often used in constructing digital twins in the SE(2) state space.

Table 1- Comparison of the basic mathematical equations of kinematics for mobile robot models that are most often used in constructing digital twins in the SE(2) state space.

Model	State vector	Control input	Mathematical equations	Model feature
1	2	3	4	5
Unicycle model [5,32]	$q = [x, y, \theta]^T$	$u = [v, w]^T$	$\dot{x} = v \cos \theta$ $\dot{y} = v \sin \theta$ $\dot{\theta} = w$	The simplest kinematic model describing the motion of a robot as a material point with orientation
Differential Drive model [6, 33]	$q = [x, y, \theta]^T$	$u = [v_l, v_r]^T$	$\dot{x} = \frac{R}{2} (v_r + v_l) \cos \theta$ $\dot{y} = \frac{R}{2} (v_r + v_l) \sin \theta$ $\dot{\theta} = \frac{R}{L} (v_r - v_l)$	Takes into account separate speeds of left and right wheels; corresponds well to real two-wheeled platforms
Bicycle model [7,34]	$q = [x, y, \theta]^T$	$u = [v, \delta]^T$	$\dot{x} = v \cos \theta$ $\dot{y} = v \sin \theta$ $\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta$	Simplifies a four-wheel platform to a single front steered wheel
Omni-directional model [8, 35]	$q = [x, y, \theta]^T$	$u = [v_x, v_y, w]^T$	$\dot{x} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta$ $\dot{y} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta$ $\dot{\theta} = w$	Allows movement in any direction without necessarily changing orientation
Ackermann model [9, 36]	$q = [x, y, \theta]^T$	$u = [v, \delta]^T$	$\dot{x} = v \cos \theta$ $\dot{y} = v \sin \theta$ $\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta$	Geometrically closer to the automotive platform, where steering is taken into account

* where: x, y - robot coordinates in the global system; θ - robot orientation angle; v - linear velocity; w - angular velocity; v_l, v_r - left and right wheel velocity; r - wheel radius; L - robot base or distance between wheels/axles; δ - steering wheel angle; v_x, v_y - velocity components in the local robot system.

Figure 1 shows kinematic diagrams of mobile platforms with different types of control models in the state space SE(2).



a) Unicycle model [5,32]; b) Differential Drive model [6,33]; c) Bicycle model [7,34];
 d) Omni-directional model [8,35]; e) Ackermann model [9,36]

Figure 1 - Kinematic diagrams of mobile platforms with different types of control models in the SE(2) state space

As can be seen from Fig. 1a, the kinematic scheme of the Unicycle model in the SE(2) state space is presented, where the platform state is given by the minimal vector $q = [x, y, \theta]^T$, and the control is determined by the linear velocity v and angular velocity w (Table 1). Qualitatively, this model is the most generalized and compact, since it describes the robot motion as the movement of a material point with an orientation without explicit consideration of the chassis design. This makes it convenient for forming a digital twin at the early stages of modeling. Numerically, its advantage lies in the minimal dimensionality of the state space and simple equations: $\dot{x} = v \cos \theta$; $\dot{y} = v \sin \theta$; $\dot{\theta} = w$, due to which the trajectory integration is stable, fast and low-cost in terms of computational resources. In a comparative aspect, this model is inferior to others in terms of physical detail, but surpasses them in terms of simplicity of implementation, versatility and ease of use in algorithms for planning movement, localization and basic prediction of the state of a digital twin. According to Fig. 1b, the Differential Drive model is shown, in which the same state space SE(2) is supplemented with physically meaningful control variables v_l and v_r , corresponding to the speeds of the left and right wheels. Qualitatively, such a scheme better reflects the real structure of two-wheeled mobile platforms, since the rotation and translational motion arise as a consequence of the difference or equality of the speeds of the wheels, which provides a direct connection between the chassis geometry and the behavior of the robot. Numerically, this model is described by the equations: $\dot{x} = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \cos \theta$; $\dot{y} = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \sin \theta$; $\dot{\theta} = \frac{R}{L}(v_r - v_l)$, where parameters r and L allow us to quantitatively assess the influence of wheel radius and base on maneuverability: with increasing difference $v_r - v_l$ the angular velocity increases, and with increasing L the turn becomes more inertial. Compared to the Unicycle model, this scheme is more accurate for digital twins of two-wheeled platforms, although somewhat more complex, but it provides a better balance between mathematical simplicity, physical interpretability and suitability for practical implementation. Fig. 1c shows the kinematic scheme of the Bicycle model, in which a four-wheeled or automobile platform is reduced to a simplified equivalent system with one front steered wheel and a base L . Qualitatively, this model well reflects the transport nature of traffic, when the orientation changes not due to independent wheel drive, but due to the steering wheel rotation angle ψ or δ , which provides smoother and geometrically more plausible trajectories. Numerically, its dynamics are given by the relations: $\dot{x} = v \cos \theta$, $\dot{y} = v \sin \theta$, $\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta$, from which it can be seen that at constant v increasing the steering angle causes a nonlinear increase in angular velocity, and increasing the base L reduces the sensitivity of the platform to rotation. In comparison, this model is more physically correct for ground transport robots than Unicycle, but less universal for platforms with independent drive, and its main advantage for a digital twin is an adequate reproduction of the geometry of the turn and the radius of curvature of the trajectory. Fig. 1d shows an Omni-directional model, in which motion in SE(2) space is implemented through independent velocity components v_x, v_y and angular velocity w , and the kinematics takes into account the features of a multi-wheeled omnidirectional chassis. Qualitatively, this scheme is the most maneuverable among all considered, since it allows the platform to move along two axes of the plane without the mandatory coordination of the direction of velocity with the current orientation of the body, which is especially important for mobile manipulators, logistics robots and collaborative systems in narrow working areas. Numerically, such a model is given by the equations: $\dot{x} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta$; $\dot{y} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta$; $\dot{\theta} = w$. This means that the platform has three independent levels of control in the plane, i.e. its kinematics matrix is more complete than the Unicycle, Differential Drive and Bicycle models, where the direction of translational motion is rigidly connected to the longitudinal axis of the body. In a comparative aspect, this model provides the highest functional flexibility of the digital twin, but requires more complex control, more accurate calibration and consideration of slip, so in terms of computational simplicity it is inferior to more classical kinematic schemes. According to Fig. 1e, the Ackermann model is depicted, which is a development of automotive kinematics taking into account the steering of the front axle and the geometric limitations of the chassis. Qualitatively, this scheme most adequately describes real automotive, Automated Guided Vehicle (AGV) and service transport platforms [37], which are characterized by limited lateral movement, smooth turning and the presence of a pronounced dependence between the steering angle, the base L and the radius of turn. Numerically, its model in the SE(2) state space has the same structure as the Bicycle model, i.e.: $\dot{x} = v \cos \theta$; $\dot{y} = v \sin \theta$; $\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta$ but the interpretation of the parameters is more physically accurate, since it is directly related to the geometry of the steering mechanism and the angle of deflection of the steered wheels. Compared to the Bicycle model, this scheme is more engineeringly justified for transport platforms, compared to the Differential Drive, it is less maneuverable in a limited space, and compared to the Omni-directional model, it is significantly inferior in freedom of movement, but surpasses most models in the realism of reproducing the automobile mode of movement in a digital twin.

Thus, the combined qualitative, numerical and comparative analysis of kinematic schemes in the SE(2) state space shows that the Unicycle model is the simplest and most convenient for basic numerical modeling, the Differential Drive provides the best fit for two-wheeled mobile platforms, the Bicycle and Ackermann are appropriate for transport robots with steering, and the Omni-directional model provides maximum maneuverability and functional flexibility. From the point of view of building digital twins, the choice of a particular model is determined by a compromise between the accuracy of physical reproduction, computational complexity, chassis structure and requirements for control and

navigation algorithms in a dynamic environment. The advantages and disadvantages of motion models are presented in Table 2

Table 2 – Advantages and disadvantages of movement models

Movement model	Brief description	Advantages	Disadvantages
1	2	3	4
Unicycle model	Kinematic model of a unicycle robot with control via linear velocity v and angular velocity ω .	Very simple mathematical structure; convenient for analytical modeling and trajectory planning algorithms (A*, D*, MPC); well suited for numerical modeling and testing of navigation algorithms.	Does not account for the real design of robots with two or more wheels; ignores dynamics and slippage; digital twin accuracy is limited for real platforms.
Differential Drive model	Robot model with two independent drive wheels (left and right velocity v_l, v_r)	Describes mobile platforms more realistically; simple control implementation; integrates well with sensor models (LiDAR, cameras, IMU); widely used in ROS and autonomous navigation systems	Limited maneuverability (no lateral movement); accumulation of odometry errors; more difficult to model wheel slip and surface irregularities.
Bicycle model	A simplified car-type model where the front wheels are combined into one steered wheel.	Describes transport platforms and autonomous carts well; allows for turning radius; suitable for trajectory prediction and MPC control.	Less accurate for robots with independent wheels; ignores complex chassis kinematics; requires additional parameters for accurate modeling.
Omni-directional model	Robot model with omni- or mecanum wheels that allow movement in any direction.	Full maneuverability (3 DOF in a plane); ability to move without changing orientation; high positioning accuracy in narrow spaces; useful for warehouse or collaborative Industry 5.0 robots.	More complex kinematic equations; sensitivity to slip; complexity of hardware implementation and control; requires more complex control algorithms
Ackermann model	Kinematic model of automotive control with Ackerman geometry.	Realistically describes automotive and AGV platforms; provides physically correct turning geometry; suitable for simulations of autonomous transportation systems.	Limited maneuverability in tight spaces; more difficult to plan trajectories in dense environments; not suitable for robots with independent wheel drive.

The analysis of the basic mathematical models of the movement of mobile collaborative robots shows that each of the considered models has its own area of expedient application depending on the level of detail of the digital twin and the requirements for control and navigation systems. Simplified models of the Unicycle type provide high computational efficiency and ease of integration into planning algorithms, while Differential Drive allows you to more accurately reproduce the kinematics of real two-wheeled platforms. The Bicycle and Ackermann models are more adequate for transport robots with steering, providing a physically correct representation of movement trajectories, while Omni-directional models provide maximum maneuverability and flexibility in dynamic environments. Thus, the choice of a model for building a digital twin is determined by a compromise between accuracy, computational complexity and requirements for the functionality of the robotic system. To further summarize the results obtained, it is advisable to consider Table 3 – Comparison of the effectiveness of basic kinematic models of mobile robots according to key criteria used in the development of digital twins of collaborative robots and motion planning systems.

Table 3. – Comparison of the effectiveness of basic kinematic models of mobile robots according to key criteria used in the development of digital twins of collaborative robots and motion planning systems.

Model	Maneuverability	Computational complexity	Digital twin accuracy	Suitability for trajectory planning algorithms	Typical areas of application
1	2	3	4	5	6
Unicycle model	Medium	Very low	Low (simplified abstraction)	Very high – convenient for A*, D*, MPC, RL	Theoretical research, testing of navigation algorithms

Differential Drive model	Medium	Low	High for two-wheeled platforms	High – integrates well with SLAM and ROS	Service robots, warehouse AGVs, mobile collaborative robots
Bicycle model	Medium	Low	Medium	Average – used in motion prediction tasks	Autonomous transport platforms, robotic carts
Omni-directional model	Very high	Medium	High for omni/mecanum platforms	High – convenient for local planning	Warehouse work, mobile manipulators, HRC systems
Ackermann model	Low–medium	Medium	High for automotive platforms	Medium – more difficult in narrow environments	Autonomous vehicles, AGV transport platforms

To study the trends in the use of the models considered above, presented in Table 1 and Figure 1, it is proposed to analyze publications in the international metric database Scopus for the period from 2022 to 2025 [38]. An example of queries for the keyword “Unicycle model” is given below.:

$$\begin{aligned}
 & TITLE-ABS-KEY("Unicycle model") AND PUBYEAR > 2021 AND PUBYEAR < 2026 \\
 & AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English")) \\
 & TITLE-ABS-KEY("Unicycle model") AND TITLE-ABS-KEY("control" OR "trajectory planning" OR "navigation") AND PUBYEAR > 2021 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar")) AND \\
 & (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English"))
 \end{aligned} \tag{1}$$

As a result of the research in the international metric database Scopus on "keywords" such as: Unicycle model, Differential Drive model, Bicycle model, Omni-directional model, Ackermann model according to the following forms of search queries presented in 1, total references to 1849 manuscripts of articles in English were obtained. The results of the analysis of publications in the international metric database Scopus for the period from 2022-2025 by "keywords" are presented in Table 4.

Table 4 - Results of the analysis of publications in the international metric database Scopus for the period from 2022-2025 by "keywords"

Model	Year				Total
	2022	2023	2024	2025	
1	2	3	4	5	6
Unicycle model	14	16	23	21	75
Differential Drive model	211	239	320	682	1452
Bicycle model	70	58	89	91	308
Omni-directional model	1	2	5	2	10
Ackermann model	-	-	2	2	4

The results obtained (Table 4) indicate a significant uneven distribution of scientific publications between different kinematic models of mobile robots. The most intensive growth is demonstrated by the Differential Drive model, the number of publications for which increases sharply in 2025, which indicates its dominant role in modern research on mobile robotics and digital twins. The Bicycle model is characterized by moderate stable dynamics with minor fluctuations, which indicates its application in specialized tasks, in particular autonomous transport. The Unicycle model demonstrates a gradual increase in interest, which is associated with its use as a basic mathematical model in theoretical research. At the same time, the Omni-directional and Ackermann models have a low level of representation, which may be due to their narrower applied specialization or the complexity of implementation in practical systems. For the convenience of analyzing the data obtained from Table 4, let us present them in the form of a graph “Publications by Robot Motion Models (2022-2025)” which is presented in Figure 2.

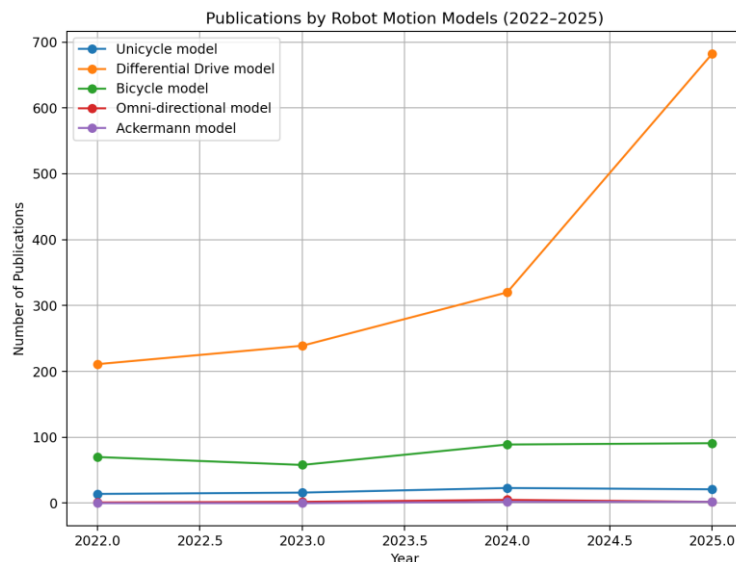


Figure 2. – Publications by Robot Motion Models (2022-2025)

The results obtained (Table 4 and Fig. 2) demonstrate that the number of publications for the Differential Drive model (1452 works) significantly exceeds other models, in particular by more than 4.7 times compared to the Bicycle model (308) and by almost 19 times compared to the Unicycle model (75), which indicates its dominant position in the scientific space. This trend is explained by the fact that the Differential Drive provides an optimal balance between computational simplicity (low complexity, as in the Unicycle) and physical adequacy to real two-wheeled platforms, which is critically important for building digital twins in navigation, SLAM and collaborative control tasks. Qualitatively, this model is the most universal for real service and warehouse robots (AGV), which are widely used in Industry 5.0, while the Omni-directional and Ackermann models have a limited scope or increased implementation complexity. The sharp increase in numbers in 2025 (from 320 to 682 publications, i.e. more than 2 times) reflects the active implementation of ROS-oriented systems, multi-robot platforms and digital twins, where Differential Drive is the de facto standard. In a comparative aspect, it is the combination of ease of integration, availability of hardware implementation and high correspondence to physical systems that determines its significantly higher usage rates compared to other kinematic models.

Conclusions.

As a result of the study, it was found that mathematical models of mobile robots in the Digital Twin concept form the basis for adequate reproduction of kinematics, dynamics and interaction of robotic systems in a digital environment, ensuring a balance between modeling accuracy and computational efficiency. The qualitative and comparative analysis showed that simplified models of the Unicycle type are effective for theoretical research and planning algorithms, while Differential Drive provides the most optimal combination of physical reliability and practical feasibility for two-wheeled platforms. Numerical analysis of publications in the Scopus database confirmed the dominance of the Differential Drive model, which reflects its key role in modern tasks of autonomous navigation, SLAM and collaborative control of mobile robots. At the same time, the Bicycle and Ackermann models demonstrate the feasibility of application in transport systems, while Omni-directional models provide increased maneuverability in complex dynamic environments, but require more complex control algorithms. The results obtained indicate that the choice of a mathematical model for a digital twin is determined by a compromise between the level of detail, the type of platform, and the requirements for control and navigation algorithms. Thus, the results of the study can be effectively used in the design of digital twins of mobile robots, the development of autonomous navigation systems, multi-robot systems, as well as in the optimization of logistics processes and intelligent production within the framework of the Industry 5.0 concept.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest, in particular financial, personal, authorial or any other nature, which could affect the research, as well as the results published in this article.

Funding

Funding was provided within the framework of the implementation of the state theme "Hardware and software complex for detection and neutralization of explosive objects based on intelligent robotic platforms" at the Department of Computer Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering (CITARBI), Kharkiv National University of Radio Electronics.

References:

1. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M., Rejeb, A., Foroughi, B., & Nikbin, D. (2025). Beyond Industry 4.0: a systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, 17(4), 889-914. <https://doi.org/10.1108/APJBA-08-2023-0384>
2. Chu, C. H., Zhang, Y. W., Zheng, P., Ferrise, F., & Chang, Q. (Eds.). (2025). Human–Robot Collaboration in Industry 5.0. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 25(5), 050301. <https://doi.org/10.1115/1.4068118>
3. Lin, X., Guo, Z., Jin, X., & Guo, H. (2025). Digital twin-enabled safety monitoring system for seamless worker-robot collaboration in construction. *Automation in Construction*, 174, 106147. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106147>
4. Nevliudov, I. ., Omarov, M. ., Yevsiev, V. ., Maksymova, S. ., & Jabrayilzade, E. . (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. *Advanced Information Systems*, 10(1), 11–20. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.02>
5. Gutierrez, A., Rios, H., & Mera, M. (2025). A robust trajectory tracking controller for constrained and perturbed unicycle mobile robots. *Asian Journal of Control*, 27(6), 2694-2705. <https://doi.org/10.1002/asjc.3632>
6. Krecht, R., & Ballagi, Á. (2025). Curvature-Constrained Motion Planning Method for Differential-Drive Mobile Robot Platforms. *Applied Sciences*, 16(1), 322. <https://doi.org/10.3390/app16010322>
7. Bu, Y., Dun, L., Deng, Y., Jiang, B., Jiang, A., & Zhu, H. (2025). Development of a Bicycle-like Magnetic-Wheeled Climbing robot with adaptive plane-transition capabilities. *Machines*, 13(2), 167. <https://doi.org/10.3390/machines13020167>
8. Sakata, R., Takemoto, J., & Tsubouchi, T. (2025). Relative Posture Estimation of Multiple Linked Omni-Directional Mobile Robots Using Only Wheel Encoders and Passive Movements. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 37(1), 191-202. <https://doi.org/10.20965/jrm.2025.p0191>
9. ŠELEK, A., Hrabar, I., & ŠTEKOVIĆ, S. (2025, February). Reactive navigation of the Ackermann steering robot in unknown environments. In 2025 11th International Conference on Automation, Robotics, and Applications (ICARA) (pp. 209-213). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICARA64554.2025.10977587>
10. Simion, G., Filipescu, A., Ionescu, D., & Filipescu, A. (2025). Cloud/VPN-Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber–Physical Robotic System—Digital Twin Approach. *Sensors*, 25(2), 591. <https://doi.org/10.3390/s25020591>
11. Nevliudov, I. ., Yevsiev, V. ., Maksymova, S. ., Gopejenko, V. ., & Kosenko, V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
12. Yang, H., Qin, Z., Xia, Y., & Cheng, F. (2024). Digital twin-based autonomous navigation and control of omnidirectional mobile robots. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 74(4), 5687-5697. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3520991>
13. Tagliavini, L., Colucci, G., Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., & Quaglia, G. (2022). Wheeled mobile robots: state of the art overview and kinematic comparison among three omnidirectional locomotion strategies. *Journal of intelligent & robotic systems*, 106(3), 57. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01745-7>
14. Sarcinelli-Filho, M., & Carelli, R. (2023). Kinematic models. In *Control of ground and aerial robots* (pp. 5-22). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23088-2>
15. Poduval, D. R., & Rajalakshmy, P. (2022, December). A review paper on autonomous mobile robots. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2670, No. 1, p. 030005). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0116722>
16. Alexa, O., Ciobotaru, T., Grigore, L. Ş., Grigorie, T. L., Ştefan, A., Oncioiu, I., ... & Vlădescu, C. (2023). A review of mathematical models used to estimate wheeled and tracked unmanned ground vehicle kinematics and dynamics. *Mathematics*, 11(17), 3735. <https://doi.org/10.3390/math11173735>
17. Pantoja-García, J. S., Rodríguez-Molina, A., Villarreal-Cervantes, M. G., Palma-Huerta, A. A., Aldape-Pérez, M., & Sandoval-Gutiérrez, J. (2026). Generalized Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots: A Unified Framework for Heterogeneous Architectures. *Mathematics*, 14(3), 415. <https://doi.org/10.3390/math14030415>
18. Simerean, A. C., & Tătar, M. O. (2025). Tetrahedral Mobile Robots: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 15(18), 9979. <https://doi.org/10.3390/app15189979>
19. Kadar, F., & Tătar, M. O. (2025, October). Literature Review of Mobile Robots with Reconfigurable Whigs-Wheel Locomotion Units. In *IFTToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines (SYROM)* (pp. 163-173). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14023-4_16
20. Badamasi, M. A., Kabir, I. K., Ahmed, G., & El-Ferik, S. (2025). Autonomous Mobile Robot Path Planning Techniques, A Review: Classical and Heuristic Techniques. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3579863>
21. Xia, T., Li, D., Chen, D., Bian, Z., & Zhang, S. (2025, June). A Review of Path Planning Techniques for Multi-Mobile Robots. In 2025 5th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms (CAIBDA) (pp. 763-773). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAIBDA65784.2025.11182779>

22. Zhang, Zhuo and Wang, Zexing and Zhang, Xuping, Kinematics and Comparative Evaluation of a Novel Decoupled, Redundantly-Actuated Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Trajectory Tracking Validation. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=6350964> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6350964>
23. Maclean, C., & Biggs, J. D. (2013). Path planning for simple wheeled robots: Sub-Riemannian and elastic curves on SE (2). *Robotica*, 31(8), 1285-1297. <https://doi.org/10.1017/S0263574713000519>
24. Belvedere, T., Cognetti, M., Oriolo, G., & Giordano, P. R. (2025). Sensitivity-aware model predictive control for robots with parametric uncertainty. *IEEE Transactions on Robotics*. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3554415>
25. Zhang, A., Zhou, R., Zhang, T., Zheng, J., & Chen, S. (2025). Balance control method for bipedal wheel-legged robots based on friction feedforward linear quadratic regulator. *Sensors*, 25(4), 1056. <https://doi.org/10.3390/s25041056>
26. Ghadimzadeh Alamdari, A., Zade, F. A., & Ebrahimkhanlou, A. (2025). A review of simultaneous localization and mapping for the robotic-based nondestructive evaluation of infrastructures. *Sensors*, 25(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s25030712>
27. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>
28. Sorrentino, I., Romualdi, G., Moretti, L., Traversaro, S., & Pucci, D. (2025). Physics-informed neural networks with Unscented Kalman Filter for sensorless joint torque estimation in humanoid robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3562792>
29. Zhang, G., & Wang, L. (2025). Stochastic adaptive estimation in polynomial curvature shape state space for continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 42, 261-280. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3637147>
30. Li, Z., Du, M., Qin, J., & Chen, X. (2025). Research on robot path planning based on multi-strategy genetic ant colony optimization algorithm. *Information Sciences*, 718, 122407. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122407>
31. Hu, B., Tian, H., Wang, D., Huang, H., Zhu, X., Walters, R., & Platt, R. (2025). Push-grasp policy learning using equivariant models and grasp score optimization. *IEEE Robotics and Automation Letters*. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3606392>
32. Rizal, Y., Agustinah, T., Dikairono, R., & Du, H. (2026). Design, Modeling, and Control of Unicycle Robots: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 14, 20570-20588. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3662281>
33. Guffanti, D., Mora Murillo, M. F., Hinojosa, M. A., Bustamante Sanchez, S., Obregón Gutiérrez, J. O., Gutiérrez, N., & Sánchez, M. (2025). Comparison of Two System Identification Approaches for a Four-Wheel Differential Robot Based on Velocity Command Execution. *Sensors*, 25(11), 3553. <https://doi.org/10.3390/s25113553>
34. Abrar, S., Baig, M. Z., Anzal, S. U. I., & Memon, A. B. (2025, April). Analyzing Uncertainty in the Spatial Representation of the Kinematic Bicycle Model. In *2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing, and Communication (ICETECC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETECC65365.2025.11070299>
35. Deng, Z., & Meng, Q. (2025, July). Design and simulation analysis of three omni-directional wheels chassis for spherical robot. In *IET Conference Proceedings CP936* (Vol. 2025, No. 30, pp. 260-265). Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/icp.2025.3273>
36. Qi, H., Li, X., Ding, L., Cheng, Q., Gao, H., Terze, Z., & Deng, Z. (2025). Enhancing maneuverability in a variable wheelbase wheeled mobile robot through dynamic steering curvature control. *Journal of field robotics*, 42(4), 1244-1270. <https://doi.org/10.1002/rob.22437>
37. Liu, Z., Sang, H., Zhang, B., Meng, L., & Meng, T. (2025). A learning-based two-stage multi-thread iterated greedy algorithm for co-scheduling of distributed factories and automated guided vehicles with sequence-dependent setup times. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2025.3540405>
38. Scopus: A comprehensive abstract and citation database for impact makers. URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

References (transliterated)

1. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M., Rejeb, A., Foroughi, B., & Nikbin, D. (2025). Beyond Industry 4.0: a systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, 17(4), 889-914. <https://doi.org/10.1108/APJBA-08-2023-0384>
2. Chu, C. H., Zhang, Y. W., Zheng, P., Ferrise, F., & Chang, Q. (Eds.). (2025). *Human-Robot Collaboration in Industry 5.0*. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 25(5), 050301. <https://doi.org/10.1115/1.4068118>
3. Lin, X., Guo, Z., Jin, X., & Guo, H. (2025). Digital twin-enabled safety monitoring system for seamless worker-robot collaboration in construction. *Automation in Construction*, 174, 106147. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106147>
4. Nevliudov, I. ., Omarov, M. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Jabrayilzade, E. . (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. *Advanced Information Systems*, 10(1), 11-20. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.02>

5. Gutierrez, A., Rios, H., & Mera, M. (2025). A robust trajectory tracking controller for constrained and perturbed unicycle mobile robots. *Asian Journal of Control*, 27(6), 2694-2705. <https://doi.org/10.1002/asjc.3632>
6. Krecht, R., & Ballagi, Á. (2025). Curvature-Constrained Motion Planning Method for Differential-Drive Mobile Robot Platforms. *Applied Sciences*, 16(1), 322. <https://doi.org/10.3390/app16010322>
7. Bu, Y., Dun, L., Deng, Y., Jiang, B., Jiang, A., & Zhu, H. (2025). Development of a Bicycle-like Magnetic-Wheeled Climbing robot with adaptive plane-transition capabilities. *Machines*, 13(2), 167. <https://doi.org/10.3390/machines13020167>
8. Sakata, R., Takemoto, J., & Tsubouchi, T. (2025). Relative Posture Estimation of Multiple Linked Omni-Directional Mobile Robots Using Only Wheel Encoders and Passive Movements. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 37(1), 191-202. <https://doi.org/10.20965/jrm.2025.p0191>
9. ŠELEK, A., Hrabar, I., & ŠTEKOVIĆ, S. (2025, February). Reactive navigation of the Ackermann steering robot in unknown environments. In *2025 11th International Conference on Automation, Robotics, and Applications (ICARA)* (pp. 209-213). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICARA64554.2025.10977587>
10. Simion, G., Filipescu, A., Ionescu, D., & Filipescu, A. (2025). Cloud/VPN-Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber-Physical Robotic System—Digital Twin Approach. *Sensors*, 25(2), 591. <https://doi.org/10.3390/s25020591>
11. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
12. Yang, H., Qin, Z., Xia, Y., & Cheng, F. (2024). Digital twin-based autonomous navigation and control of omnidirectional mobile robots. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 74(4), 5687-5697. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3520991>
13. Tagliavini, L., Colucci, G., Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., & Quaglia, G. (2022). Wheeled mobile robots: state of the art overview and kinematic comparison among three omnidirectional locomotion strategies. *Journal of intelligent & robotic systems*, 106(3), 57. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01745-7>
14. Sarcinelli-Filho, M., & Carelli, R. (2023). Kinematic models. In *Control of ground and aerial robots* (pp. 5-22). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23088-2>
15. Poduval, D. R., & Rajalakshmy, P. (2022, December). A review paper on autonomous mobile robots. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2670, No. 1, p. 030005). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0116722>
16. Alexa, O., Ciobotaru, T., Grigore, L. Ș., Grigorie, T. L., Ștefan, A., Oncioiu, I., ... & Vlădescu, C. (2023). A review of mathematical models used to estimate wheeled and tracked unmanned ground vehicle kinematics and dynamics. *Mathematics*, 11(17), 3735. <https://doi.org/10.3390/math11173735>
17. Pantoja-García, J. S., Rodríguez-Molina, A., Villarreal-Cervantes, M. G., Palma-Huerta, A. A., Aldape-Pérez, M., & Sandoval-Gutiérrez, J. (2026). Generalized Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots: A Unified Framework for Heterogeneous Architectures. *Mathematics*, 14(3), 415. <https://doi.org/10.3390/math14030415>
18. Simerean, A. C., & Tătar, M. O. (2025). Tetrahedral Mobile Robots: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 15(18), 9979. <https://doi.org/10.3390/app15189979>
19. Kadar, F., & Tătar, M. O. (2025, October). Literature Review of Mobile Robots with Reconfigurable Whegs-Wheel Locomotion Units. In *IFTToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines (SYROM)* (pp. 163-173). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14023-4_16
20. Badamasi, M. A., Kabir, I. K., Ahmed, G., & El-Ferik, S. (2025). Autonomous Mobile Robot Path Planning Techniques, A Review: Classical and Heuristic Techniques. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3579863>
21. Xia, T., Li, D., Chen, D., Bian, Z., & Zhang, S. (2025, June). A Review of Path Planning Techniques for Multi-Mobile Robots. In *2025 5th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms (CAIBDA)* (pp. 763-773). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAIBDA65784.2025.11182779>
22. Zhang, Zhuo and Wang, Zexing and Zhang, Xuping, Kinematics and Comparative Evaluation of a Novel Decoupled, Redundantly-Actuated Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Trajectory Tracking Validation. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=6350964> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6350964>
23. Maclean, C., & Biggs, J. D. (2013). Path planning for simple wheeled robots: Sub-Riemannian and elastic curves on SE (2). *Robotica*, 31(8), 1285-1297. <https://doi.org/10.1017/S0263574713000519>
24. Belvedere, T., Cognetti, M., Oriolo, G., & Giordano, P. R. (2025). Sensitivity-aware model predictive control for robots with parametric uncertainty. *IEEE Transactions on Robotics*. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3554415>
25. Zhang, A., Zhou, R., Zhang, T., Zheng, J., & Chen, S. (2025). Balance control method for bipedal wheel-legged robots based on friction feedforward linear quadratic regulator. *Sensors*, 25(4), 1056. <https://doi.org/10.3390/s25041056>
26. Ghadimzadeh Alamdari, A., Zade, F. A., & Ebrahimkhanlou, A. (2025). A review of simultaneous localization and mapping for the robotic-based nondestructive evaluation of infrastructures. *Sensors*, 25(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s25030712>

27. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>
28. Sorrentino, I., Romualdi, G., Moretti, L., Traversaro, S., & Pucci, D. (2025). Physics-informed neural networks with Unscented Kalman Filter for sensorless joint torque estimation in humanoid robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3562792>
29. Zhang, G., & Wang, L. (2025). Stochastic adaptive estimation in polynomial curvature shape state space for continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 42, 261-280. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3637147>
30. Li, Z., Du, M., Qin, J., & Chen, X. (2025). Research on robot path planning based on multi-strategy genetic ant colony optimization algorithm. *Information Sciences*, 718, 122407. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122407>
31. Hu, B., Tian, H., Wang, D., Huang, H., Zhu, X., Walters, R., & Platt, R. (2025). Push-grasp policy learning using equivariant models and grasp score optimization. *IEEE Robotics and Automation Letters*. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3606392>
32. Rizal, Y., Agustinah, T., Dikairono, R., & Du, H. (2026). Design, Modeling, and Control of Unicycle Robots: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 14, 20570-20588. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3662281>
33. Guffanti, D., Mora Murillo, M. F., Hinojosa, M. A., Bustamante Sanchez, S., Obregón Gutiérrez, J. O., Gutiérrez, N., & Sánchez, M. (2025). Comparison of Two System Identification Approaches for a Four-Wheel Differential Robot Based on Velocity Command Execution. *Sensors*, 25(11), 3553. <https://doi.org/10.3390/s25113553>
34. Abrar, S., Baig, M. Z., Anzal, S. U. I., & Memon, A. B. (2025, April). Analyzing Uncertainty in the Spatial Representation of the Kinematic Bicycle Model. In *2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing, and Communication (ICETECC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETECC65365.2025.11070299>
35. Deng, Z., & Meng, Q. (2025, July). Design and simulation analysis of three omni-directional wheels chassis for spherical robot. In *IET Conference Proceedings CP936* (Vol. 2025, No. 30, pp. 260-265). Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/icp.2025.3273>
36. Qi, H., Li, X., Ding, L., Cheng, Q., Gao, H., Terze, Z., & Deng, Z. (2025). Enhancing maneuverability in a variable wheelbase wheeled mobile robot through dynamic steering curvature control. *Journal of field robotics*, 42(4), 1244-1270. <https://doi.org/10.1002/rob.22437>
37. Liu, Z., Sang, H., Zhang, B., Meng, L., & Meng, T. (2025). A learning-based two-stage multi-thread iterated greedy algorithm for co-scheduling of distributed factories and automated guided vehicles with sequence-dependent setup times. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2025.3540405>
38. Scopus: A comprehensive abstract and citation database for impact makers. URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

Received (надійшла) 10.11.2025

About the Authors / Відомості про авторів

Vladyslav Yevsieiev (Євсєєв Владислав В'ячеславович) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7085>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190568855>.

Svitlana Maksymova (Максимова Світлана Святославівна) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: svitlana.milyutina@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1375-9337>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57199329065>.

Nikolaj Starodubcev (Стародубцев Микола Григорович) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58886884800>.

Olena Chala (Чала Олена Олександрівна) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: olena.chala@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2454-3774>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211027250>.

Dmytro Gurin (Гурін Дмитро Валерійович) – senior lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: dmytro.gurin@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2272-5227>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57209640958>.

Ювілеї та пам'ятні дати

ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ ТИМОФІЄВ – до 90-річчя з дня народження

29 травня 2025 року виповнилося 90 років з дня народження нашого Вчителя, академіка АН Вищої школи України, доктора технічних наук, професора, багаторічного завідувача кафедрою «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХП» **Тимофієва Юрія Вікторовича**.



Ю.В.Тимофієв – засновник наукового напрямку, пов'язаного з підвищенням ефективності проектування, виготовлення та використання агрегованих технологічних систем механообробки. Його докторська дисертація «Основи аналізу та синтезу систем механообробки методами технологічної подібності» у 1985 році була кваліфікована спеціалізованою вченою радою Тульського політехнічного інституту як новий розділ теорії технологічних систем.

Народився Юрій Вікторович 29 травня 1935 р. у м. Харків. Найтяжчі роки Другої світової війни, дитинство в окупованому Харкові, руїни, голод виховали волю та характер молодій й цілеспрямованій людині. З метою бути корисним у відновленні народного господарства країни та в пошуках себе у 1949 році закінчив ремісниче училище, працював токарем на Харківському заводі транспортного машинобудування ім. Малишева. У 1954 р. із срібною медаллю закінчив вечірню школу робітничої молоді, вступив та у 1959 р. закінчив машинобудівний факультет Харківського політехнічного інституту, одержавши кваліфікацію інженера-механіка за спеціальністю «Технологія машинобудування, металорізальні верстати та інструменти». Далі здобував виробничий досвід працюючи інженером-конструктором Спеціального конструкторського бюро №7 на Харківському верстатобудівному заводі ім. С.В. Косіора та на заводі «Серп і Молот».

З 1961 року почав працювати у ХПІ на кафедрі «Технологія машинобудування та металообробні верстати», пройшовши шлях від асистента до професора, завідувача кафедри (очолив кафедру у 1984 році). У 1969 р. захистив кандидатську, а у 1985 р. докторську дисертацію.

З 1969 по 1972 рік працював на посаді заступника декана, а з 1972 по 1974 рік на посаді декана машинобудівного факультету.

У 1994 році Юрію Вікторовичу присвоєно звання академіка Академії вищої школи України за відділенням механіки та машинобудування. Лауреат премії Міністерства освіти України за досягнення в науково-педагогічній та методичній роботі.

Протягом 32 років очолював кафедру «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», котра веде підготовку бакалаврів, магістрів, докторів філософії, кандидатів та докторів наук з машинобудівних спеціальностей. За роки керівництва був значно покращений кадровий склад кафедри.





Особистість професора Тимофієва Ю.В. є яскравим прикладом поєднання високопрофесійного науковця і досвідченого педагога, який вніс значний вклад у підготовку інженерно-технічних кадрів та науковців вищої кваліфікації. Професор Тимофієв Ю.В. є засновником у 1993 році спеціалізованої вченої ради з захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями 05.02.08 - «Технологія машинобудування» та 05.03.01 - «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» у НТУ «ХП». На протязі багатьох років професор Тимофієв Ю.В. входив до складу експертної ради ВАК України.

Під керівництвом професора Тимофієва Ю.В. підготовлено і захищено 12 докторських та 12 кандидатських дисертацій. Учні професора Тимофієва Ю.В. успішно працюють не тільки в нашому університеті. В свій час закінчили аспірантуру, стали кандидатами наук та фахівцями вищої кваліфікації під керівництвом професора Тимофієва Ю.В. громадяни Іраку, Нігерії, Домініканської Республіки, Китаю. Учень професора Тимофієва Ю.В. Хайдар Абдулхасан Хусейн Аль-Етарі очолює факультет інженерії матеріалів Вавилонського університету (Ірак), є дослідником у сфері процесів виробництва та обробки композитів і легких металів.

Тимофієв Ю.В. є автором понад 300 науково-методичних праць та 6 патентів. На протязі багатьох років Тимофієв Ю.В. є керівником держбюджетних науково-дослідних тем за фундаментальними дослідженнями, координуваними МОН України, науково-дослідних робіт за договорами про науково-технічне співробітництво між НТУ «ХП» та підприємствами Харкова.

За ініціативою та підтримкою проф. Тимофієва Ю.В. були створено та плідно працювали філії кафедри на Харківському заводі агрегатних верстатів, Держаному підприємстві ХМЗ «ФЕД» та інших підприємствах, на яких були зосереджені теоретичні та експериментальні дослідження, пов'язані з удосконаленням технологічних методів виробництва та ефективності використання верстатів, де проходили практичну підготовку здобувачі вищої освіти та мали можливість підвищувати кваліфікацію викладачі кафедри.

Юрій Вікторович назавжди у серцях, думках і ділах його вдячний учнів та колег.



АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ ГРАБЧЕНКО – Вчений, Педагог, Керівник, Людина

Виповнюється 90 років з дня народження Заслуженого працівника вищої школи України, доктора технічних наук, професора, багаторічного завідувача кафедрою «Інтегровані технології машинобудування імені М.Ф.Семка» **Грабченка Анатолія Івановича**.

Грабченко Анатолій Іванович — представник наукової школи фізики процесів різання матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».



Народився Анатолій Іванович 1 листопада 1935 р. у м. Костянтинівка Донецької області. Тут же він закінчив середню школу, проявив перші задатки організатора.

У 1958 р. закінчив з відзнакою машинобудівний факультет Харківського політехнічного інституту за спеціальністю «Технологія машинобудування, металорізальні верстати та інструменти». Після закінчення інституту залишився працювати в Харківському політехнічному інституті. Обіймав посади: асистента, старшого викладача, доцента кафедри різання матеріалів та різальних інструментів.

У 1966 р. захистив кандидатську дисертацію за темою «Исследование процесса алмазного шлифования инструментальных материалов». З 1967 р. Анатолій Іванович — доцент кафедри, а з 1990 р. — професор. У 1995 р. захистив докторську дисертацію «Наукові основи алмазного шліфування надтвердих полікристалічних матеріалів».

З 1979 р. по 2017 р. А. І. Грабченко був завідувачем кафедри «Різання матеріалів та різальні інструменти» (нині — кафедра «Інтегровані технології



машинобудування імені М. Ф. Семка»). Тривалий час очолюючи кафедру, він був ініціатором створення: першої в Харківському політехнічному інституті філії кафедри на виробництві; факультетського центру обчислювальної техніки; принципово нових лекційних курсів та організації підготовки інженерів з 4-х нових спеціальностей: «Високі технології в машинобудуванні», «Надтверді матеріали і процеси їх обробки», «Менеджмент і маркетинг високих технологій», «Інтегровані генеративні технології машинобудування». Багато років він очолював єдину в колишньому СРСР Проблемну лабораторію фізики процесів різання інструментами з надтвердих матеріалів і Галузеву лабораторію алмазних інструментів Мінверстатопрома СРСР.

А.І.Грабченко, виконав ряд фундаментальних робіт в області технології обробки матеріалів різанням, розробив цикл досліджень по оброблюваності широкого спектра важкооброблюваних матеріалів, сформулював ряд наукових положень про взаємодію алмазного інструмента й оброблюваного матеріалу, створив і розвив теорію керування процесом шліфування надтвердих матеріалів шляхом зміни швидкості структурно-топографічного пристосовування робочої поверхні алмазних кругів.



А.І.Грабченко вчасно оцінив тенденції створення ефективних високих інтегрованих технологій. Ним запропоновано концепцію інтегрованих генеративних технологій макро-, мікро- і нанорівней; обґрунтовано і організовано розвиток наукових досліджень в даному напрямку; створено перший і поки єдиний в Україні центр високих інтегрованих технологій, оснащений сучасним обладнанням адитивних технологій та програмним забезпеченням. Кафедра почала підготовку фахівців в області генеративних технологій для реалізації цієї ідеології на виробництві.

Результати наукової праці А.І. Грабченка опубліковано у виді більш 500 наукових праць у вітчизняних і закордонних виданнях, 14 монографіях (у тому числі і з закордонними співавторами), навчальних посібниках, що містять результати наукових розробок, доповідях на міжнародних і закордонних конференціях Оригінальні наукові положення захищено авторськими свідоцтвами (понад 80) і патентами (5 українських і 5 закордонних).



Анатолій Іванович Грабченко — видатний вчений у галузі обробки матеріалів різанням. Коло його наукових інтересів – проблеми механіки та фізики високоточного різання, комбінованих процесів шліфування важкооброблюваних матеріалів; створення надтвердих матеріалів та їх використання у прогресивних конструкціях та технологічних процесах; генеративні технології виготовлення виробів. Він — автор теорії управління процесом шліфування надтвердих матеріалів та концепції трьох рівнів генеративних технологій. Автор нових

способів обробки шліфуванням, які базуються на управлінні робочою поверхнею шліфувальних кругів. Цей науковий напрям відкрив нові технологічні можливості алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів.

Наукові розробки Анатолія Івановича запроваджені на багатьох підприємствах України, Угорщини, Німеччини, зокрема на Полтавському алмазному заводі, на заводі «ФЕД», «Турбоатом», Чепельському інструментальному заводі (м. Будапешт), у Мішкольцькому університеті (м. Мішкольц, Угорщина), Магдебурзькому університеті (Німеччина) та ін.

А. І. Грабченко заснував і з 1990 р. по 2022 р. очолював постійно діючий міжнародний програмний комітет щорічного міжнародного науково-технічного семінару «ІНТЕРПАРТНЕР» «Високі технології в машинобудуванні», який з 2018 року перетворений в Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes «InterPartner», матеріали якої подаються до бази даних SCOPUS та інших індексуєчих сервісів а подання доповідей підтримується системою управління конференціями EasyChair.

Він, також, багато років очолював організаційний комітет щорічної міжнародної науково-практичної конференції «MicroCAD». Крім того, він був членом редколегії низки періодичних наукових видань, наприклад, міжнародного науково-технічного збірника «Різання та інструмент в технологічних системах», заснованого у 1966 р.

А.І. Грабченко підготував більш 20 кандидатів і 5 докторів технічних наук, а також активно брав участь у процесі атестації науковців як опонент, як заступник голови експертної ради Вищої атестаційної комісії, а з 2004 року як голова Спеціалізованої Ради по захисту дисертацій на здобуття вчених ступенів.

Як професіонал високого рівня А.І. Грабченко запрошувався для роботи в комісії з машинобудування Комітету з Державних премій України, у наукові Ради НАН України по окремих проблемах. Він був членом постійно діючих програмних і організаційних комітетів міжнародних наукових форумів і редакційних колегій наукових видань в Угорщині, Польщі, Румунії, Німеччини, науково-методичної ради Міністерства освіти і науки і Фахової ради України з технічної механіки.

Плідна праця А. І. Грабченка була неодноразово відмічена почесними званнями та нагородами, серед яких:

- «Заслужений робітник вищої школи Української РСР» (1985 р.);
- Почесний доктор (Honoris Causa), Почесний професор Мішкольцького університету (Угорщина, 1993 р.);
- дійсний член Американської асоціації інженерів-механіків та технологів SME/AMT (1994 р.
- член Асоціації технологів-машинобудівників України (1995 р.);
- академік Академії наук вищої школи (1995 р.);
- Почесний професор Петрошанського університету (Румунія, 1995 р.);
- Член міжнародної асоціації інструментальників;
- Почесний доктор Одеського національного політехнічного університету, Донбаської державної машинобудівної академії, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (2005 р.);
- лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2008 р.);
- Почесний професор Житомирського державного технологічного університету (2014 р.).

Крім того, він нагороджений Великою золотою медаллю Мішкольцького університету (Угорщина), Почесною медаллю Отто фон Геріке (Магдебурзький університет, Німеччина), Почесною медаллю В. М. Бакуля (Інститут надтвердих матеріалів НАН України), Почесною медаллю Познанської Політехніки (Польща), Почесними грамотами Харківської обласної адміністрації та Міністерства освіти і науки України та ін.

Життєвий шлях вченого, що його пройшов Анатолій Іванович, є зразком людської гідності, працелюбності, добропорядності, відповідальності, вміння служити на благо науки та рідної держави, що є добрим прикладом для наслідування, як для всіх нас так і прийдешніх поколінь

ЗМІСТ

<i>Клименко С. А., Манохін А. С., Чумак А. О., Копейкіна М. Ю., Клименко С. А.</i> Моделювання сил косокутного різання інструментом з круглою пластиною з пкнб при обробці загартованої сталі з ударом	3
<i>Дергоусов В. М., Пермяков О. А.</i> Про особливості виготовлення редукторів різання очисних вугільних комбайнів в умовах дрібносерійного виробництва.....	11
<i>Гасанов М. І., Охріменко О. А., Клочко О. О., Федоренко В. С., Ланьо К. Р., Горбулик В. І.</i> Дисипативне моделювання технологічних систем при зубообробці важконантажених зубчастих коліс.....	21
<i>Доля В. Е., Яковенко І. Е.</i> Аналітичний огляд досліджень технологічного забезпечення реверс-інжинірингу відповідальних деталей газотурбінних установок.....	32
<i>Дербаба В. А., Козенко В. А., Богданов О. О., Козенко В. І., Алексеєнко С. В.</i> Використання технологій 3d-друку під час проектування засобів обробітку ґрунту.....	40
<i>Старченко В. В., Камчатная-Степанова К. В., Главчева Ю. М., Волошкіна І. В., Клочко Л. В., Волошкін М. Д.</i> Інтегровані технології вібростабілізації для забезпечення точності виготовлення крупногабаритних станин важкого верстатобудування.....	50
<i>Дядя С. І., Козлова О. Б., Яхно Д. А., Судник А. В.</i> Вплив часу різання на параметри коливань при кінцевому фрезеруванні.....	60
<i>Охріменко О. А., Майборода В. С., Заковоротний О. Ю., Гасанов М. І., Клочко О. О., Глушко С. С., Федоренко В. С.</i> Використання нейронних мереж у побудові дослідницької моделі імпульсного зубофрезерування.....	64
<i>Мироненко С. О.</i> Дослідження коефіцієнтів ковзання між зубами невольвентних зубчастих передач.....	70
<i>Фадеев А. В.</i> Технологічне забезпечення відновлення деталей із застосуванням реверсивного інжинірингу.....	80
<i>Стрельчук Р. М., Рябенков І. О.</i> Дослідження залишкових напружень і зносостійкості твердого сплаву після електроерозійного алмазного шліфування.....	88
<i>Тарельник В. Б., Доценко А. О., Мотузний М. М.</i> Підвищення зносостійкості захисних втулок сальникових ущільнень насосів, працюючих в умовах підвищеної корозійної і абразивної активності.....	94
<i>Kovalevskyy S.</i> Magnetic-resonance amorphization of contact kinematic pair materials.....	102
<i>Новіков Ф. В., Жовтобрюх В. О.</i> Методологія аналітичного визначення сили різання та напруження різання, умови їх зменшення.....	116
<i>Колісник К. Д.</i> Аналіз початкового етапу згинання однорогого кованого гака великої вантажопідйомності при різних температурних режимах.....	124
<i>Ахмедов А. О., Чухліб В. Л., Губський С. О., Біба М. В.</i> Дослідження впливу режиму кування при розкочуванні на оправці на якість поковок.....	133
<i>Доля В. С., Чухліб В. Л., Бобров О. Г., Таран О. В.</i> Дослідження впливу схем ковальського протягування на нерівномірність деформації при вільному куванні.....	138
<i>Воропаєв М. В., Набока О. В.</i> Сучасні рішення для прецизійного контролю в машинобудуванні.....	145
<i>Бірюков С. В., Губський С. О., Ілленко К. В., Горбач С. Д., Говорун В. В.</i> Аналіз конструкцій підвішування редукторів на рухомому складі метрополітенів, високошвидкісних поїздів та низькопідлогових трамваїв.....	151
<i>Черкашин Д. В., Саєнко О. Ф., Явтушенко А. В., Бабай Ю. В., Губський С. О.</i> Порівняльний аналіз вібрацій за допомогою швидкого перетворення фур'є та вейвлет-перетворення.....	163
<i>Степанов М. С., Літовченко П. І., Іванова М. С., Ходаков Л. В., Гасанов М. І., Руднєв О. В.</i> Ефективність виходжування при шліфуванні в різноманітних умовах.....	174

<i>Nevliudov I., Omarov M., Yevsieiev V., Jabrayilzade E.</i> Development of a decision-making method for trajectory planning in an uncertain dynamic environment for a collaborative mobile robot.....	183
<i>Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N., Chala O., Gurin D.</i> Mathematical models of mobile robots in the digital twin concept: comparative analysis and research of usage trends.....	198
ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ ТИМОФІЄВ – до 90-річчя з дня народження.....	210
АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ ГРАБЧЕНКО – Вчений, Педагог, Керівник, Людина.....	212

CONTENTS

<i>Klymenko S., Manokhin A., Chumak A., Kopeiikina M., Klymenko S.</i> Modeling of oblique cutting forces using a round pebn insert tool during interrupted turning of hardened steel.....	3
<i>Dergouzov V., Permyakov O.</i> On the features of manufacturing cutting gearboxes for coal miners in small-scale production conditions.....	11
<i>Hasanov M., Okhrimenko O., Klochko O., Fedorenko V., Lano K., Gorbulyk V.</i> Dissipative modeling of technological systems in gear machining of heavy-loaded gears.....	21
<i>Dolia V., Yakovenko I.</i> Analytical review of technological support for the reverse engineering of critical gas turbine components.....	32
<i>Derbaba V., Kozenko V., Bohdanov O., Kozenko V., Aleksieienko S.</i> Use of 3d printing technologies in the design of soil tillage equipment.....	40
<i>Starchenko V., Kamchatnaya-Stepanova K., Glavcheva Y., Voloshkina I., Klochko L., Voloshkin M.</i> Integrated vibration stabilization technology to ensure the accuracy of manufacturing of large-sized machinery bands.....	50
<i>Dyadya S., Kozlova O., Yakhno D., Sudnik A.</i> The influence of cutting time on the vibration parameters during finish milling.....	60
<i>Okhrimenko O., Mayboroda V., Zakovorotniy O., Gasanov M., Klochko O., Glushko S., Fedorenko V.</i> Use of neural networks in construction of a research model of pulse gear milling.....	64
<i>Mironenko S.</i> Research of slip coefficients between teeth of non-evolvent gears.....	70
<i>Fadeev A.</i> Technological support for the restoration of parts using reverse engineering.....	80
<i>Strelchuk R., Riabenkov I.</i> Regulation of thermal processes during electroerosive grinding with variable electrode polarity.....	88
<i>Tarelnyk V., Dotsenko A., Motuznyi M.</i> Improving the wear resistance of protective sleeves of packing seals in pumps operating under conditions of increased corrosive and abrasive activity.....	94
<i>Kovalevskyy S.</i> Magnetic-resonance amorphization of contact kinematic pair materials.....	102
<i>Novikov F., Zhovtobryukh V.</i> Methodology of analytical determination of cutting force and cutting stress, conditions for their reduction.....	116
<i>Kolisnyk K.</i> Analysis of the initial bending stage of a heavy-duty single-horn forged hook under different temperature conditions.....	124
<i>Akhmedov A., Chukhlib V., Hubskeyi S., Biba M.</i> Study of the influence of the forging regime during rolling on a mandrel on the quality of forgings.....	133
<i>Dolia V., Chukhlib V., Bobrov O., Taran O.</i> Research on the influence of forging drawing schemes on the nonuniformity of deformation in free forging.....	138
<i>Voropaiev M., Naboka O.</i> Modern solutions for precision control in mechanical engineering.....	145
<i>Biriukov S., Hubskeyi S., Illienko K., Horbach S., Hovorun V., Klymenko V.</i> Analysis of suspension structures of reducers on rolling stock of metropolitans, high-speed trains and low-floor tramways.....	151
<i>Cherkashyn D., Saienko O., Yavtushenko A., Babai Y., Hubskeyi S.</i> Comparative analysis of vibrations using fast fourier transform and wavelet transform.....	163

<i>Stepanov M., Litovchenko P., Ivanova M., Khodakov L., Hasanov M., Rudnev A.</i> Grinding efficiency in various conditions.....	174
<i>Nevliudov I., Omarov M., Yevsieiev V., Jabrayilzade E.</i> Development of a decision-making method for trajectory planning in an uncertain dynamic environment for a collaborative mobile robot.....	183
<i>Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N., Chala O., Gurin D.</i> Mathematical models of mobile robots in the digital twin concept: comparative analysis and research of usage trends.....	198
YURII VIKTOROVYCH TYMOFIIEV – do 90-richchia z dnia narodzhennia.....	210
ANATOLII IVANOVYCH HRABCHENKO – <i>Vchenyi, Pedahoh, Kerivnyk, Liudyna</i>	212

ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В
МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць

№ 2'(12) 2025

Відповідальний редактор

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

*Зам. відповідального
редактора*

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

Технічний редактор:

*В.С. Федоренко, доктор філософії, асистент
НТУ «ХПІ», Україна*

*Відповідальний
секретар:*

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

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати
Кафедра інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khi.edu.ua, ukrstanko21@ukr.net

Підп. до друку 15.12.2025 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 42.
Ціна договірна.

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
2480000000079553, від 16.05.2007 р.