



**СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА І РЕМОНТУ  
В ПРОМИСЛОВОСТІ ТА НА ТРАНСПОРТІ**



Асоціація технологів-машинобудівників України  
Академія технологічних наук України  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України

Український державний університет залізничного  
транспорту

ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»

ПАТ «Ільницький завод механічного зварювального  
обладнання»

Машинобудівний факультет Белградського університету

Грузинський технічний університет

# **СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ І НА ТРАНСПОРТІ**

**Матеріали**

**24 Міжнародного науково-технічного семінару**

*26–27 березня 2024 р.*

Київ – 2024

**Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті:** Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – 178 с.

Тематика семінару:

- Сучасні тенденції розвитку технології машинобудування
- Підготовка виробництва як основа створення конкурентоспроможної продукції
- Стан і перспективи розвитку заготівельного виробництва
- Удосконалення технологій механічної та фізико-технічної обробки в машино- і приладобудуванні
- Ущільнюючі технології та покриття
- Сучасні технології та обладнання в складальному і зварювальному виробництві
- Ремонт і відновлення деталей машин у промисловості і на транспорті, обладнання для виготовлення, ремонту і відновлення
- Стандартизація, сертифікація, технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів машино- та приладобудування
- Впровадження стандартів ДСТУ ISO 9001 у промисловості, вищих навчальних закладах, медичних установах і органах державної влади
- Метрологія, технічний контроль та діагностика в машино- і приладобудуванні
- Екологічні проблеми та їх вирішення у сучасному виробництві

**Матеріали представлені в авторській редакції**

© АТМ України,  
2024 р.

*Анісімов В.В.* Український державний  
хіміко-технологічний університет,  
*Анісімов В.М.* Український державний  
університет науки і технологій, Дніпро, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ З ДАТАСЕТОМ МАЛОГО РОЗМІРУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ЗОРУ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Використання штучного інтелекту, зокрема нейромереж, є одним з найбільш перспективних трендів у машинобудуванні. Штучний інтелект є одним зі стовпів VI промислової революції та відкриває такі можливості автоматизації технологічних процесів, які є просто недосяжними з використанням традиційних технологій. Проте типовий процес навчання нейромережі, як правило, передбачає використання дуже великих ресурсів, як машинних, так і людських. Складнощі мають місце на двох стадіях.

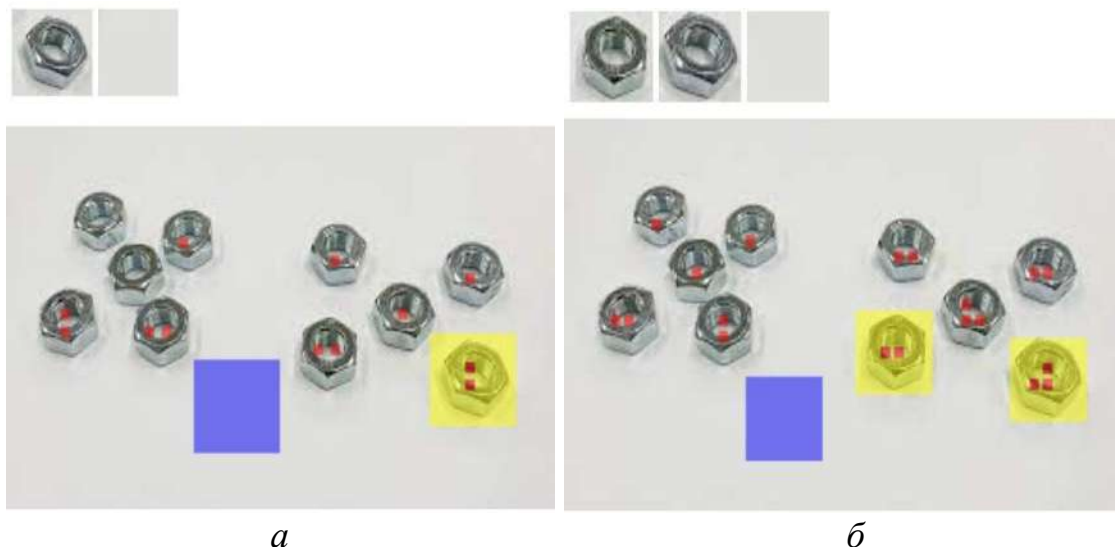
Перша стадія – підготовка датасету, тобто набору зразків для навчання нейромережі. Типовий розмір датасету – тисячі чи десятки тисяч зразків, які потрібно підготувати, класифікувати саме людині. Така робота є дуже трудомісткою.

Друга стадія – навчання нейромережі. При значному розмірі датасету навчання може вимагати значної потужності обчислювальної техніки та втрат часу. Слід відмітити, що складності на цьому етапі не такі значні і проявляються при дійсно великих датасетах або при складних задачах для нейромережі.

На даний момент існує лише декілька суто евристичних способів визначення допустимого розміру датасету [1, 2].

В рамках проведених досліджень зроблено перші кроки у вивченні можливостей нейромереж, які навчені на датасетах малого розміру. Для прикладу взято завдання пошуку об'єкту «гайка» на зображенні, яке симулює процес технічного контролю виготовленої продукції.

На рис. 1 представлено умови та результати навчання нейромережі (перцептрон з одним прихованим шаром). Зверху в рядок вишикувані фрагменти зображення, взяті за навчальні зразки. На самому зображенні області, з яких взято зразки, підсвічено напівпрозорими прямокутниками. В результаті навчання та застосування нейромережі для пошуку об'єктів знайдені предмети марковані точками по центру.



**Рис. 1 – Результати пошуку об'єкта «гайка»:**

*a* – при двох навчальних зразках; *б* – при трьох навчальних зразках

З рис. 1, *a* видно, що при кількості, яка дорівнює двом зразкам (найменша можлива кількість зразків для навчання) вже спостерігається розпізнавання 80% об'єктів, а при збільшенні кількості зразків до трьох спостерігається успішне розпізнавання усіх предметів.

Слід відмітити, що при таких малих кількостях зразків дуже великий вплив має якість вибору предметів. Обрані зразки повинні якомога краще висвітлювати можливі варіації у зовнішньому вигляді об'єктів, що підлягають розпізнаванню. Також в даному випадку маємо досить просту задачу – розпізнавання гайок, що схожі одна на одну і лише трохи відрізняються розташуванням та розміром (перспектива). При ускладненні задачі можлива необхідність збільшення кількості зразків.

В результаті проведених досліджень показано, що є принаймні один вид задач, який може бути розв'язаний за допомогою нейромереж з мінімальним розміром датасета, причому вже цей вид задач може мати практичне застосування у промисловості. В подальшому актуальною задачею може бути дослідження можливостей використання малих датасетів для вирішення більш широкого спектру задач.

## Література

1. Althnian, Alhanoof. Impact of Dataset Size on Classification Performance : An Empirical Evaluation in the Medical Domain / Alhanoof Althnian, Duaa AlSaeed, Heyam Al-Baity, Amani Samha, Alanoud Bin Dris, Najla Alzakari, Afnan Abou Elwafa, Heba Kurdi // Appl. Sci. – 2021. – Vo. 11(2). – P. 796–799.

2. Ajiboye, A. R. Evaluating the effect of dataset size on predictive model using supervised learning technique / A. R. Ajiboye, R. Abdullah-Arshah, H. Qin, H. Isah-Kebbe // Inter. J. of Software Eng. & Comp. Sci. – 2015. – Vol. 1. – P. 75–84.

*Балицька Н.О., Москвін П.П., Крижанівський В.Б.*  
Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир  
*Манохін А.С.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЗМОЧУВАННЯ ФРЕЗЕРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ НІТИНОЛУ**

Забезпечення необхідного характеру взаємодії різних рідин з механічно обробленими поверхнями виробів є важливим технічним завданням. Саме сукупність фізичних та хімічних явищ, що мають місце під час таких процесів, визначає ряд функціональних характеристик виробів. Дослідження цих явищ стає особливо актуальним, коли функціональними характеристиками виробів необхідно керувати на макрорівні, і, коли фрактальні властивості поверхні неможливо ігнорувати.

Авторами виконано комплекс експериментальних досліджень змочування фрезерованих поверхонь зразків з нітинолу (Ni 56,5, Ti 43,5% за масою) дистильованою водою та індустріальною оливою I-20. Контрольною характеристикою для опису взаємодії рідин із поверхнями зразків було обрано крайовий кут змочування. Вимірювання проводилися на контактному кутовому гоніометрі для дослідження змочування твердих тіл рідинами. Аналіз фотографічних зображень краплі, що лежить на поверхні зразка, проводився за допомогою графічного редактора. Як зразки використовувалися поверхні кубів з нітинолу 30·30·30 мм після сухого торцевого фрезерування на обробному центрі DMU 80 Evo Deckel Maho із змінними режимами різання інструментом із твердосплавними круглими пластинами без покриття.

Мультифрактальні характеристики поверхонь дослідних зразків отримували шляхом обробки мікрофотографій їх поверхонь, отриманих з оптичного профілометра Keyence VR-6000. Розрахунок мультифрактальних параметрів поверхонь здійснювали за до-

помогою спеціальної, розробленої авторами, обчислювальної програми [1–4], яка враховувала всю просторову картину поверхневого мікрорельєфу. Програмна реалізація методу огрублених розбиттів дала змогу знайти характеристичні функції та мультифрактальні спектри поверхонь дослідних зразків.

Фрактальні характеристики поверхонь, що взаємодіють з рідиною, розраховували шляхом розкриття нормованих результатів роботи обчислювальної програми, коли досліджений простір розбивали на елементарні куби. Аналіз процесу взаємодії рідин із фрезерованою поверхнею проводили відповідно до моделі Венцеля-Дерягіна [5, 6]. Отримана формула для розрахунку площі аналізованої ділянки поверхні зразка за своїм виглядом відповідає результатам [7]. Однак фізичний зміст параметрів, що входять у розрахунковий вираз, було скориговано відповідно до даних про реалізацію методу огрублених кубічних розбиттів. Вираз для розрахунку крайового кута змочування було застосовано для опису отриманих експериментальних результатів. Розрахункові результати було співставлено з отриманими експериментальними даними. Спостережувана відповідність розрахункових результатів і експериментальних підтверджує можливість застосування запропонованого виразу для визначення крайового кута змочування рідини при її взаємодії із фрезерованою поверхнею нітинолу.

## Література

1. Moskvina, P. Multifractal spectrums for volumes of spatial forms on surface of  $Zn_xCd_{1-x}Te-Si$  (111) heterostructures and estimation of the fractal surface energy / P. Moskvina, V. Kryzhanivskyy, P. Lytvyn, L. Rashkovetskyi // *J. of Crystal Growth*. – 2016. – 450. – P. 28–33.
2. Moskvina, P. Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling / P. Moskvina, N. Balytska, P. Melnychuk, V. Rudnitskyi, V. Kyrylovych // *EEJET*. – 2017. – 2(1–85). – P. 9–15.
3. Balytska, N. Multifractal parameterization of a periodic surface microrelief formed at the face milling. 1. The distribution of elements area of surface relief / N. Balytska, L. Penter, S. Ihlenfeldt, V. Kryzhanivskyy, P. Melnychuk, P. Moskvina // *Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des.* – 2023. – 6. – P. 561–572.
4. Balytska N., Penter L., Kryzhanivskyy V., Melnyk O., Polonsky L., Shadura V., Ihlenfeldt S., Moskvina P. Multifractal parameterization of a periodic surface microrelief formed at the face milling. 2. Distribu-

tion of elements volume of surface relief / // Multiscale and Multidiscip. Model., Exp. and Des. – 2023. – 9. – P.

5. Eustathopoulos, N. Wettability at High Temperatures / N. Eustathopoulos, M. G. Nicholas, B. Drevet. – Pergamon Materials Series, 1999. – 415.

6. Kaplan, W. D. A review of wetting versus adsorption, complexions, and related phenomena: the rosetta stone of wetting / W. D. Kaplan, D. Chatain, P. Wynblatt, Carter W. Craig // J. Mater. Sci. – 2013. – Vol. 48. – P. 5681–5717.

7. Shibuichi, S. Super-Water-Repellent Fractal Surfaces / S. Shibuichi, T. Onda, N. Satoh, K. Tsujii // Langmuir. – 1996. – 12, 9. – P. 2125–2127.

*Бахман С.О.* Державний університет  
«Житомирська політехніка», Житомир, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ ЦІЛЬНОКАТАНИХ КОЛІС ТА БАНДАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

В поточний момент, у залізничному транспорті передбачається збільшення маси поїздів та зростання нормальних, тягових і гальмівних сил у потяга через збільшення обсягу перевезень. Це призводить до значного збільшення навантаження контакту коліс рухомого складу з рейками, що може підвищити знос, пошкодження і зниження надійності цього вузла тертя. Вся ця проблематика пов'язана з ефективністю перевезень, безпекою руху та економічними показниками. Саме тому необхідні багатопланові дослідження взаємодії вузлів «колесо-рейка», з урахуванням властивостей матеріалів, конструкції та режимів руху, а також впливу навколишнього середовища [1].

Збільшення кількості експлуатованих колісних пар призвело до зростання обсягів ремонтних робіт і витрат на утримання та технічне обслуговування рухомого складу. У відповідності з Правилами ремонту, у процесі експлуатації може проводитися відновлення профілю колісних пар (ТО-4) без їх викочування з-під рухомого складу на токарних або фрезерних верстатах [2].



Одним з часто використовуваних верстатів для відновлення профілю колісних пар є колісно-токарний верстат моделі А-41, виробництва Івано-Франківського заводу [3]. Колісна пара фіксується на верстаті за допомогою спеціальних буксових опор, а її обертання здійснюється за допомогою тягового електродвигуна. Підняття та вивішування колісної пари забезпечується пневматичними домкратами. Відновлення профілю кочення колісної пари виконується на два етапи: спочатку відновлюється поверхня кочення, а потім відновлюється гребінь. Поверхня кочення обробляється різцями з твердосплавними пластинами, при цьому направляючі верстата розвертаються під потрібним кутом, відповідно до кута нахилу конусної поверхні кочення. Гребінь відновлюється за допомогою ручної подачі різця, оснащеного чашечною твердосплавною пластиною. Перевагою колісно-токарного верстата моделі А-41 є його низька вартість експлуатації. Проте серед недоліків слід відзначити низьку продуктивність, потребу у ручній подачі, значний виліт ріжучого інструменту, що призводить до зниження його стійкості та погіршення якості обробки, а також низьку потужність головного приводу. Якість та продуктивність обробки на верстаті А-41 визначаються головним чином кваліфікацією персоналу.

Другим типом верстатів, широко використовуваним для обробки колісних пар, є колесофрезерний верстат моделі КЖ20 виробництва Краматорського верстатобудівного заводу (далі – КЗТС) [3]. Базова модель верстата КЖ-20 має кілька модифікацій, таких як КЖ20МФ3, КЖ20ВФ1. Верстати даної моделі складаються з механізму фрезерування та головного приводу. Механізм фрезерування встановлюється на С-подібній рамі, яка підіймається за допомогою гвинтового домкрата. У цей механізм входять спеціальні фрези та бабки з пінолями, які встановлюються в центрові отвори осі колісної пари за допомогою гвинтових підйомників із черв'ячною передачею. Головний привід забезпечує обертання колісної пари від двох роликів через гребні коліс. Відновлення профілів здійснюється за допомогою двох профільних фрез. Кожна фреза складається з корпусу, на якому закріплюються фрезерні ножі, що мають форму профілю колісної пари, на яких закріплені твердосплавні пластини. Під час відновлення профілю головний рух виконується фрезою, яка переміщується перпендикулярно до осі колісної пари, що забезпечує точність обробки. Подача реалізується за рахунок обертання колісної пари в центрах осі, що забезпечує співвісність двох коліс. Даний тип верстатів використо-

вує комбіновану схему базування колісної пари, що включає вивішування на роликах з подальшим закріпленням в центрових отворах осі. Це забезпечує досить високу продуктивність та формування мілкої стружки під час обробки. Однак у цьому типі верстатів є кілька основних недоліків: відсутність можливості регулювання глибини різання, що призводить до виконання обробки під шаблон (повна товщина гребня), що може призвести до зниження діаметра більше 5 мм та скорочення ресурсу колісної пари; потреба у доступі до центрових отворів у торці осі, що вимагає демонтажу буксових кришок, що підвищує собівартість робіт; складність у налаштуванні комплекту фрез. Крім того, обробка бандажів і суцільнокатаних коліс на верстатах даної моделі не забезпечує необхідної чистоти поверхонь, що вимагає додаткового шліфування.

Одним із перспективних напрямків у відновленні профілів кочення колісних пар без викочування з-під рухомого складу є використання верстатів із безцентровим методом обробки і використанням числового програмного керування (ЧПК). Цей метод має кілька переваг, включаючи незалежність обробки від конструкції букс та їх наявності на колісній парі, високу продуктивність через автоматизацію та неперервність процесу різання. Така технологія обробки профілів колісних пар вже впроваджена польською фірмою "РАФАМЕТ" на колесо-токарних станках UGE 300/400 N [4]. Застосування цього обладнання дозволяє значно підвищити продуктивність, збільшити швидкість виконання робіт та покращити якість обробленої поверхні. Також це дозволяє зменшити шар знімаемого металу, збільшити ресурс колісних пар та знизити енерговитрати на виконання цієї операції.

Колісно-токарні верстати UGE 300 N та UGE 400 N є двомісними токарними верстатами спеціального призначення з ЧПК, розробленими для обробки колісних пар, які використовуються у залізничних транспортних засобах. Основне їх застосування – відновлення профілів коліс та гальмівних дисків важких рейкових транспортних засобів без демонтажу колісних пар із транспортних засобів. Це дозволяє значно скоротити час простою транспортних засобів і підвищити їх ефективність. Також можливе перепрофілювання одиночних колісних пар або візків, демонтованих з транспортних засобів.

Основні технічні характеристики верстатів UGE 300/400 N: діапазон діаметрів протекторів коліс: від 540 до 1500 мм; максимальне осьове навантаження: 30/40×10 кН [4].

Операції, які можуть бути виконані верстатами: точення профілю колеса за технологічною програмою, внутрішнє та зовнішнє оброблення обода колеса, токарна обробка граничного паза, обточка гальмівних дисків. Верстати мають компакту та надзвичайно жорстку конструкцію на основі цільного (монолітного) лиття з високоякісного сірого чавуну, що забезпечує високу геометричну стабільність та максимальне ефективне гасіння вібрацій. Унікальна система підйому та приводу колісних пар, реалізована чотирма незалежними приводами, забезпечує гнучкий тиск роликів та постійний контакт між провідними роликами та колесами. Верстати також мають автоматичний та надійний вимір зносу профілю за допомогою сенсорних вимірювальних головок (лазерний вимір як опція) і продуктивно обробляють звужені профілі. Універсальне обладнання та широкі можливості програмування полегшують обробку незвичайних профілів коліс (рис. 1).



**Рис. 1 – Колісно-токарний верстат**

### **Література**

1. Рубан, В.М. Підвищення ефективності відновлення колісних пар фрезеруванням робочих поверхонь на верстатах КЖ 20 / В.М. Рубан : дис. на здобуття наук. ступ. к.т.н. – Дніпро, 2021. –196 с.
2. Наказ N-429 – Ц/Од від 15.10.2015 р. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу. – К. : Укрзалізниця, 2015. – 23 с.

3. Данилевський, В.І. Відновлення профілю кочення колісних пар без викочування під час експлуатації рухомого складу / В.І. Данилевський, С.В. Остапець, В.М. Тарасюк // Техніка і технології : зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи». – Дніпро : ДЕТУТ, 2017. – вип. 30. – Р.10–15 с.

4. <https://www.rafamet.com/en/products/machines-for-railways/underfloor-wheel-lathes/uge-300-400-n-axle-load-up-to-30-40-ton>

*Буріков О.О., Майборода В.С.* Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## **МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ МАГНІТНИХ СИЛ , ЩО ВИНИКАЮТЬ В РОБОЧИХ ЗАЗОРАХ ГОЛОВОК ТОРЦЕВОГО ТИПУ НА БАЗІ ПОСТІЙНИХ ВИСОКО ПОТУЖНИХ МАГНІТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЇХ РОЗТАШУВАННЯ І КОНСТРУКЦІЇ**

Магнітно-абразивне оброблення (МАО) це один із фінішних методів оброблення деталей як складної, так і простої геометричної форми. Проте розповсюдженість використання методу МАО у промисловості стримується відсутністю достатніх відомостей про взаємодію магнітної системи магнітно-абразивного інструменту (МАІ), впливу фактору замикання ліній магнітної індукції при використанні «осердя» із ферромагнітного матеріалу у конструкції індукторів на основі високопотужних неодимових магнітів. Відомості про взаємодію магнітного поля МАІ, зазор та використання перемички дадуть змогу синтезувати високопродуктивну конструкцію індуктора для обробки заданих поверхонь.

Використання програмного забезпечення ANSYS Maxwell дозволяє проводити всі види аналізу магнітних полів і розраховувати різні силові та магнітні характеристики. Дослідження даних факторів дозволить використати отримані експериментальні дані у процесі проектування ефективного МАІ та магнітних систем в цілому [1].

Були змодельовані різні конфігурації магнітних систем із варіацією наступних параметрів: робочий зазор між магнітами індуктора та заготовки із ферромагнітного матеріалу –  $h$ , використання ферромагнітного елемента для замикання ліній магнітної індукції з ро-

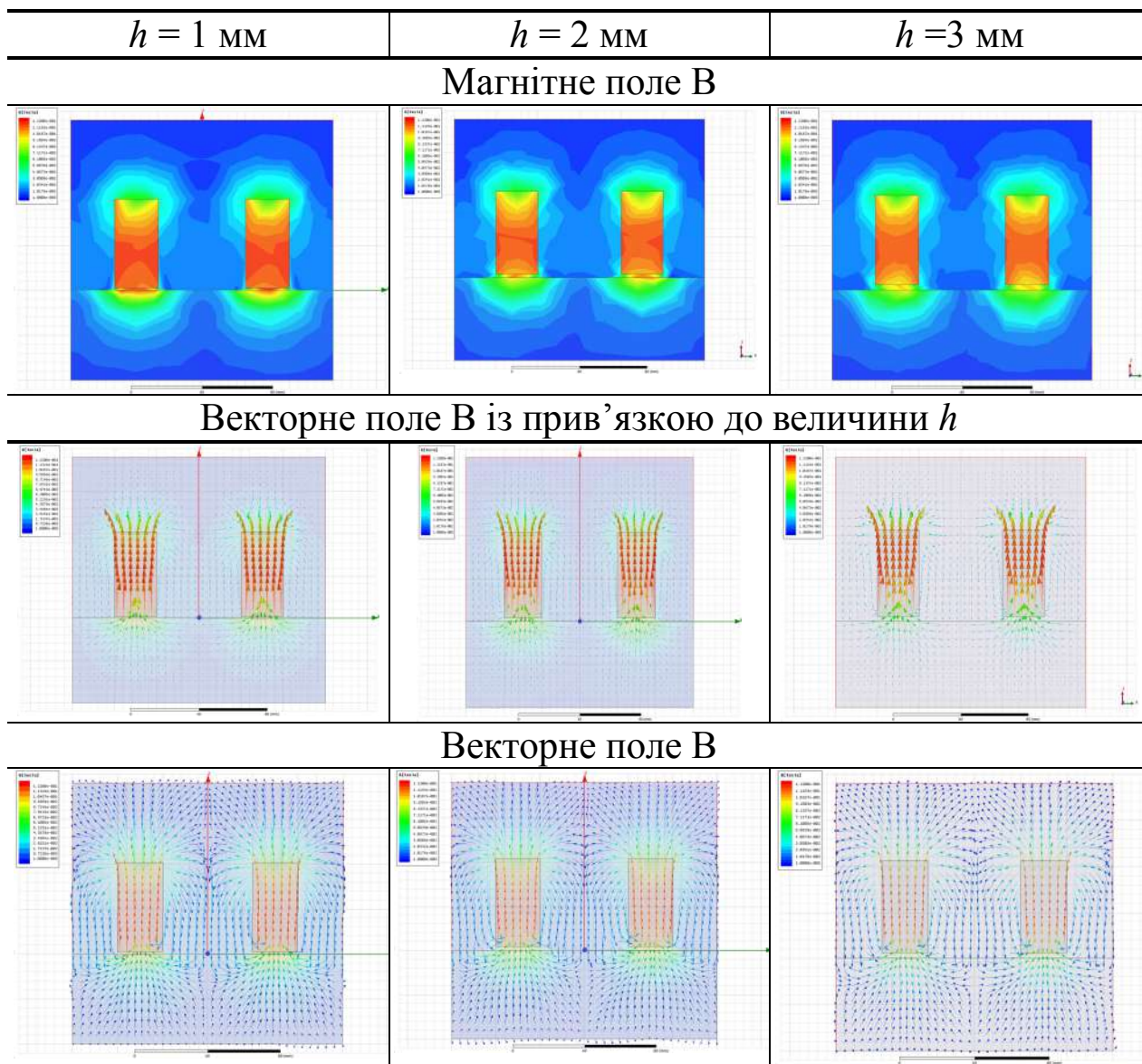
змірами величини поперечного перерізу –  $s \times l \times d$  на параметри магнітного поля ( $s = 12,5$  і  $25$  мм,  $l = 25$  мм і  $d = 100$  мм).

Моделювання велось в декілька етапів:

Етап 1. Вплив величини зазору між магнітною системою та оброблюваною деталлю  $h$ . Використовували : магніти неодимові NdFe35 –  $25 \times 25 \times 50$  мм, намагніченість – вздовж вертикальної вісі, в одному напрямку; оброблювана деталь – феромагнітна сталева пластина з розмірами  $50 \times 25 \times 150$  мм.

За результатами аналізу отриманих результатів (табл. 1), можна зробити висновок, що вплив зазору на інтенсивність магнітного поля, яке утримує магнітно-абразивний порошок (МАП) на індукторі – незначний.

**Таблиця 1 – Результати моделювання із варіацією величини зазорів  $h$**

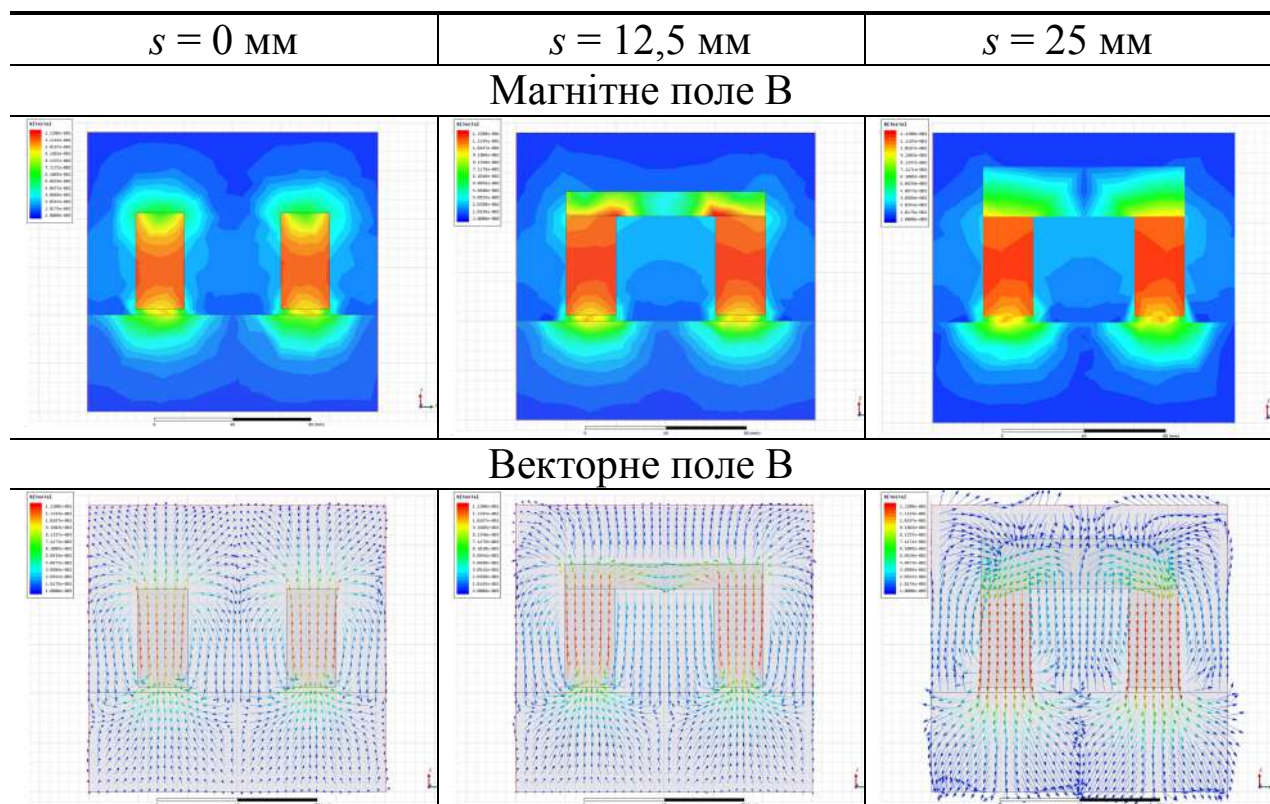


Тому для випадку обробки площин магнітними індукторами вибір робочого зазору залежить в більшості від розміру частинок, що утворюють МАІ та умов за яких відсутній ефект шаржування після обробки. Зазор в даному випадку також буде впливати на стан приповерхневого шару оброблюваного матеріалу за рахунок збільшення жорсткості МАІ при наближенні до робочої поверхні індуктора.

Етап 2. Вплив додавання замикаючого елемента між магнітами системи та оброблюваною деталлю. Використовували магніти неодимові NdFe35 – 25×25×50 мм, намагніченість – вздовж вертикальної вісі, в одному напрямку; деталь – пластина 50×25×150 мм, матеріал – чавун (cast iron); Замикаючий елемент з розмірами пластин 12,5×25×100 мм і 25×25×100 мм, матеріал – сталь; зазор –  $h = 3$  мм.

Відповідно до результатів моделювання (табл. 2) – введення замикаючого елемента спричиняє незначне підсилення магнітного поля та замикання ліній магнітної індукції. Розглянуто схему із використанням магнітів із різно направленою намагніченістю та вплив замикаючого елемента в даному випадку (табл. 3).

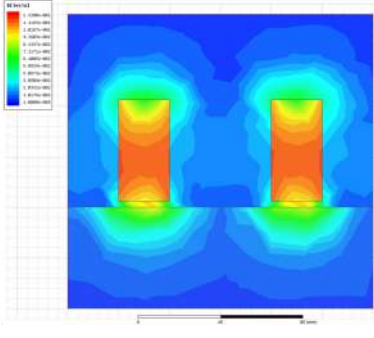
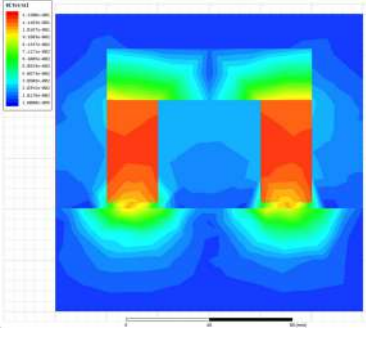
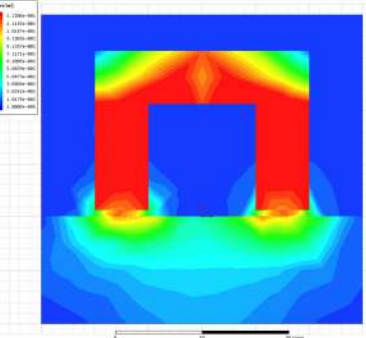
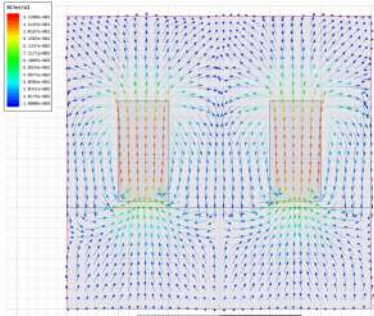
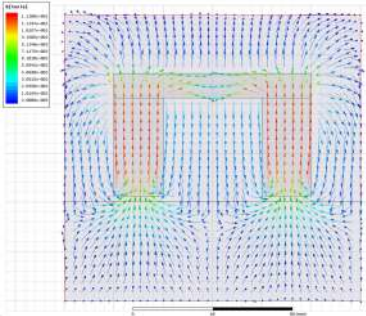
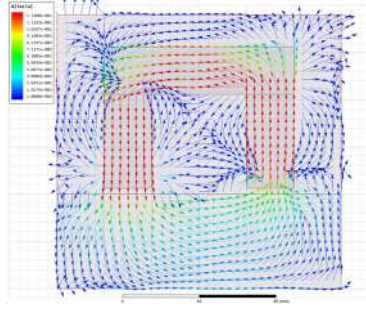
**Таблиця 2 – Результати моделювання із варіацією розмірів замикаючих елементів**



Аналіз отриманих результатів моделювання свідчить про те, що при створенні багатомігнітних систем на основі постійних магнітів

доцільно використовувати магніти із різнонаправленою намагніченістю, а також застосовувати замикаючий елемент із феромагнітного матеріалу, що дозволяє закріплювати магнітний потік та значно підсилити інтенсивність магнітного поля у зоні утворення МАІ та взаємодії із оброблюваною деталлю.

**Таблиця 3 – Порівняльна характеристика впливу направленості намагніченості магнітів**

Однонаправлена, відносно вертикальної вісі		Протилежно направлена, відносно вертикальної вісі	
$s = 0$ мм	$s = 25$ мм		
<b>Магнітне поле В</b>			
			
<b>Векторне поле В</b>			
			

### Література

1. Ren, L., Zeng, S., & Zhang, Y. (2015). Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(3), 479–487. doi:10.1016/j.ijmst.2015.03.024

*Виноградова О.П., Васильчук О.С., Майстренко А.Л.,  
Закора А.П., Ткач В.М., Білорусець В.В.,  
Бологова Л.М. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТИНОК ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗОВМІСНОГО ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТА НА МІДНІЙ ЗВ'ЯЗЦІ ПРИ ЙОГО ВІДПРАЦЮВАННІ ПО ГІРСЬКІЙ ПОРОДІ**

Зношування, руйнування та відділення матеріалу з поверхні твердого тіла, в одиницях об'єму, довжини, маси кількісно характеризуються швидкістю зношування – відношенням значення зносу до інтервалу часу, на протязі якого він виник, або інтенсивністю зношування – відношенням зносу до пройденого шляху, на якому відбулося зношування, або об'єму виконаної роботи [1]. Дослідниками абразивного зношування матеріалів, які характеризуються високою зносостійкістю, було помічено, що при зношуванні інструментальних матеріалів за контакту з абразивними середовищами в гібридних парах тертя, заглиблені в матеріал абразивні частинки, створюють у поверхневому шарі пошкодження, ідентичні до тих, які виникають під час скрайбування. Подряпини на поверхні крихкого зразка, нанесені за різних навантажень індентором, мають вигляд борозенок, складених з лунок трикутноподібної форми [2]. Після відокремлення у відібраній методом магнітної сепарації, пробі шламу, отриманій після точіння блоку гірської породи алмазним породоруйнівним інструментом при виробничому режимі експлуатації, дискретної частинки зношування матриці із Ni-Sn (6%) [3], зроблено висновок: в процесі динамічного навантаження інденторів на поверхню крихкого матричного матеріалу, утворення мікроборозенок на поверхні інструменту відбувається завдяки відколюванню дискретних частинок зношування цієї поверхні, тому, вилучені зі шламу, вони є безпосередніми свідками процесу втрати маси інструменту, крім того, вони є джерелом інформації про механізм цієї втрати.

Мета роботи – дослідження механізму відокремлення частинок зношування від робочої поверхні алмазовмісного породоруйнівного елемента на зв'язці системи Cu-Sn в результаті його відпрацювання по гірській породі при застосуванні сканувального електронного мікроскопа. Циліндричний породоруйнівний інструмент  $\varnothing$  10 мм,



оснащений алмазами АС 300 зі зернистістю 500/400 і відносною концентрацією 100% на основі Cu-Sn виготовляли методом інтенсивного резистивного електроспінання прямим пропусканням струму промислової частоти, щільністю до 20 А/мм<sup>2</sup>, протягом 12–17 с, під тиском 200 МПа. В результаті взаємодії інструмента з керном пісковика Торезького родовища з частотою його обертання 355 хв<sup>-1</sup> за радіального навантаження 300 N, при використанні стенда на базі токарно-гвинторізного верстата ДПІ-200, шлам у вигляді суспензії



**Рис. 1 – Загальний вигляд частинок зношування матриці із Cu-Sn на тлі частинок гірської породи, отриманий при застосуванні сканувального електронного мікроскопа ZEISS EVO 50 XVP**

відбирали, сушили, та досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа ZEISS EVO 50 XVP (SEM), оснащеного енергетично-дисперсійним рентгенівським аналізатором Oxford Instruments' Ultim Max100.

Представлене зображення (рис. 1) частинок зношування матриці із Cu-Sn на тлі частинок гірської породи, отримане при застосуванні зазначеного мікроскопа, та зміст табл. 1 свідчить про ідентичність хімічного складу усіх частинок матриці, крім спектру № 60, який відображає хімічний склад частинок пісковика, та про ідентичність їх трикутноподібної форми з формою

частинок зношування матриці інструмента на основі системи NiSn [3] та містить всі відповідні конфігураційні характеристики: зону заглиблення індентору, бічні та кінцеву частини [4].

**Таблиця 1 – Хімічний склад частинок матриці**

Мітка спектру	Спектр 57	Спектр 58	Спектр 59	Спектр 60	Спектр 61	Спектр 62
C	11,10	16,71	14,01	9,71	14,80	17,31
O	12,76	9,68	12,36	48,85	7,56	28,09
Na				7,30		
Al	1,07	0,77	1,20	7,58	0,60	1,07
Si	8,86	5,05	8,95	24,60	3,97	15,55
Fe						0,32
Cu	65,00	67,78	63,47	1,96	73,07	37,67
Pt	1,22					
Всього	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Отже, механізм зношування матричного матеріалу із Cu-Sn в алмазовмісному інструменті є крихким, а саме, супроводжується відколюванням дискретних частинок з утворенням мікроборозенок на поверхні зношування інструменту.

### **Література**

1. Лоладзе, Т.Н. Трибология процесса шлифования и вопросы совершенствования алмазного инструмента / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава // Синтетические алмазы. – 1974. – № 6. – С. 40–42.

2. Майстренко, А.Л. Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и износостойкости / А.Л. Майстренко, С.Н. Дуб // Заводская лаборатория. – 1991. – № 2. – С. 52–54.

3. Виноградова, О.П. Аналіз продуктів зношування композиційного алмазовмісного матеріалу / О.П. Виноградова, А.Л. Майстренко, Р.С. Шмегера, А.С. Манохін, Г.Д. Ільницька, Н.О. Олійник, Г.А. Петасюк, В.М. Ткач, О.С. Васильчук, Л.М. Бологова // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения. – 2019. – № 22. – С. 93–102.

4. Зуєвська, Н.В. Прикладні аспекти використання геостатичних методів дослідження в гірництві / Н.В. Зуєвська, Р.В. Соколевський, О.П. Виноградова, О.В. Горобчишин. – К. : Інтерсервіс, 2019. – 152 с.

*Волошин Д.І., Плескач І.І., Плескач О.І.*  
Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків, Україна

## **ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ ПІДХОДІВ ДО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВАГОНОРЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Від організації технічного обслуговування та ремонту технологічного обладнання на вагоноремонтних підприємствах залежать ступінь його зносу, час простою в ремонті, якість виконання технологічних операцій, рівень браку, а також витрати на профілактично-ремонтні заходи.

Існуюча система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) має ряд критичних недоліків – відсутність зручних інструментів

планування ремонтних робіт, трудомісткість розрахунків трудовитрат, складність оперативного корегування планованих ремонтів, деформація системи внаслідок високого ступеню зносу обладнання, що зумовлює необхідність у корегуванні графіків і виконанні великої кількості незапланованих (аварійних) ремонтів, зростання числа відмов обладнання внаслідок капітальних ремонтів, застарілі нормативи обслуговування та ремонту обладнання в діючій системі ППР та ін. В результаті збільшуються обсяги робіт і чисельність ремонтного персоналу, а матеріальні витрати за весь період експлуатації обладнання в 4–5 разів перевищують його первісну вартість.

Для вирішення визначених проблем, пов'язаних із системою планово-попереджувального ремонту обладнання, доцільно використовувати світовий досвід у даній області. З цією метою рекомендується впровадження системи тотального обслуговування обладнання (Total Productive Maintenance, скорочено – ТРМ), що успішно функціонує і доводить свою ефективність на промислових підприємствах різних країн.

Метою розгортання ТРМ є приведення до ідеального стану основних факторів виробничого середовища, що дозволить отримати максимально можливий результат у відношенні продуктивності, якості, собівартості, термінів постачань, безпеки робочих місць та ініціатив персоналу при мінімальному використанні людських, матеріальних та фінансових ресурсів.

Згідно із підходом ТРМ для оцінки ефективності виробничої системи використовуються не локальні показники, такі як коефіцієнт завантаження обладнання, а показник загальної ефективності – Overall Equipment Effectiveness (ОЕЕ), що відображає всі види втрат.

ОЕЕ – один із статичних показників, що дозволяє швидко оцінити наскільки добре технологічний процес співвідноситься з виробничим планом. Цей показник відображає ступінь доступності, ефективності роботи і рівня якості роботи обладнання. Застосування показника ОЕЕ дає можливість швидкого аналізу всіх головних процесів або ключових систем обладнання на вагоноремонтному підприємстві.

Використання показників ОЕЕ і впровадження систем підготовки звітів про продуктивність технологічного обладнання допоможе сфокусуватися на найбільш критичних параметрах стану виробничої системи.

Досягнення ефективності процесів при їх плануванні є ключовим кроком до досягнення низьких виробничих витрат. Необхідно засто-

сувати ОЕЕ до виробничих операцій і потім визначити наскільки ефективно використовується основне обладнання щодо річного фонду робочого часу. Виробничі операції з високим показником ОЕЕ матимуть найнижчу вартість одиниці виробництва.

Коефіцієнт ОЕЕ згідно прийнятої методики, для найбільш критичних одиниць обладнання на підставі виявлених витрат визначається:

$$\text{ОЕЕ} = T \cdot P \cdot A \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $T$  – коефіцієнт завантаженості по часу, що характеризує експлуатаційну готовність обладнання;  $P$  – коефіцієнт завантаженості з продуктивності, що характеризує фактичну продуктивність обладнання;  $A$  – коефіцієнт виходу якісної продукції, що враховує кількість браку.

За результатами проведених досліджень обладнання вантажного депо середнє значення показників ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) склало близько 30%. Це є дуже низьким рівнем загальної ефективності обладнання, який свідчить про недосконалість діючої системи ППР обладнання. Крім того, найнижчим є коефіцієнт завантаженості обладнання по часу, який свідчить, що обладнання не є готовим до експлуатації у часі.

## Література

1. Волошин, Д.І. Підвищення ефективності виробничих процесів ремонту вагонів методами виробничої логістики / Д.І. Волошин, Л. В. Волошина // Третя Міжнарод. наук.-техн. інтернет-конф. у співпраці з фондом Intermarium «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем», 19–20 жовтня 2022 р., м. Рівне. – Рівне : НУВГП, 2022.

2. Волошин, Д.І. Підвищення ефективності управління вагоноремонтними підприємствами / Д.І. Волошин, Л.В. Волошина // Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : мат. тез V Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф., 25–27 жовтня 2023 р., м. Рівне. – Рівне : НУВГП, 2023. – С. 70–71.

## **ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РАДІУСІВ: ІННОВАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ РАДІУСОМІРІВ**

Інноваційні комп'ютерні індикаторні радіусоміри – це нове покоління приладів які належать до концепції Індустрії 4.0 і використовуються для швидкого та прецизійного вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Вони відіграють ключову роль у покращенні точності вимірювань і допомагають зменшити помилки та витрати часу, які раніше вимагалися для корекції вимірювань. Ці радіусоміри використовують для вимірювання внутрішніх та зовнішніх радіусів з високою точністю, швидкістю, зручністю та надійністю. В них поєднують передові технології з прецизійною точністю вимірювань, що робить їх незамінними в різних галузях.

Завдяки останнім технологіям, ці інструменти надають зручність та легкість використання, маючи інтуїтивний інтерфейс та можливість налаштування для вимірювання конкретних параметрів з мінімальною мікронною похибкою. Це сприяє покращенню якості виготовленої продукції та ефективності виробничих процесів у вимірювальній галузі, роблячи їх надійним та необхідним інструментом у сучасному виробництві.

Комп'ютеризований індикаторний радіусомір “РИК” представляє собою комплексний прилад, що складається з комп'ютеризованого індикатора та змінної бази. Змінні бази оснащені кульковими або циліндричними наконечниками, які використовуються для опори на вимірювані циліндричні поверхні.

Цей радіусомір використовує передумовлені формули для автоматичного розрахування радіусів: формула знаходження зовнішнього радіусу (1), формула знаходження внутрішнього радіусу (2).

$$R = A^2/8h + h/2 - 1,5; \quad (1)$$

$$R = A^2/8h + h/2 + 1,5, \quad (2)$$

де  $A$  – довжина хорди для кожної обраної бази завжди постійна ( $A = \text{const}$ ) (вставки 10, 20, 30, 60, 100 мм);  $h$  – висота відповідного сегмента; 1,5 – розмір наконечників бази.

Мікронний індикаторний радіусомір має дискретність відліку 0,001 мм тоді як похибка становить всього  $\pm 0,8\%$ .

Завдяки використанню комп'ютерної системи ми маємо можливість використовувати всі інноваційні технології, що стосуються концепції Індустрії 4.0. Наприклад, збереження результатів вимірювань у пам'ять індикатора, використання функції ПР/НЕ прохід, Макс/Мін, формула, таймер, температурна та лінійна компенсація та насамперед бездротова (до 100 м) та USB передача даних на ПК або планшет у будь-яке ПЗ.

Після аналізу метрологічних характеристик та можливостей використання комп'ютеризованих індикаторних радіусомірів, зокрема "РИК", які представляють інноваційне покоління вимірювальних приладів, відповідних концепції Індустрії 4.0, можна зробити висновки, що ці радіусоміри відзначаються високою точністю та надійністю вимірювань геометричних параметрів об'єктів у різних галузях. Вони зменшують помилки та витрати часу, що раніше були потрібні для корекції результатів вимірювань, і дозволяють вимірювати як зовнішні, так і внутрішні радіуси з високою точністю та швидкістю.

Розглянуті радіусоміри – це інструменти, які поєднують передові технології з прецизійною точністю вимірювань і мають інтуїтивний інтерфейс для зручного використання. Завдяки комп'ютерній системі, вони можуть зберігати результати вимірювань та виконувати різні функції, що сприяє покращенню якості виготовленої продукції та ефективності виробничих процесів у вимірювальній галузі. Це робить їх незамінними інструментами у сучасному виробництві, де точність та швидкість вимірювань є важливими чинниками успіху.

## **Література**

1. Сергєєв, Д.М. Критерії обрання прецизійної координатно-вимірювальної машини / Д.М. Сергєєв, Г.Л. Комарова // Сучасні дослідження : транспортна інфраструктура та інноваційні технології : мат. II Міжнарод. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців, 29–30 листопада 2023 р., м. Київ. – Київ : Вид. «Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій», 2023.

2. Волошина, Л.В. Підвищення точності та якості вимірів при застосуванні прецизійного комп'ютерного інструменту / Л.В. Волошина, О.В. Роценко // Якість, стандартизація, контроль : теорія та практика : мат. 23-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. 27–28 вересня 2023 р., м. Київ. – Київ : АТМ України, 2023. – С.16–17.

*Волошко О.В.* Національний технічний  
університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»,  
*Іваненко Р.О.* УНДІ спеціальної техніки та  
судових експертиз, Київ, Україна

## **ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ**

Сучасні системи автоматизованого проектування технологічних процесів орієнтовані на етапи внутрішнього проектування. У цьому випадку характерними є задачі другого й третього рівня, які відповідно називаються задачами структурної та параметричної оптимізації.

При розв'язанні даних задач під терміном виробнича технологічна система будемо розуміти систему, метою якої є виготовлення певної кількості виробів за певний час, за допомогою чітко визначеної кількості обладнання. Власно кажучи, в даному випадку будемо описувати виробничу систему у термінах теорії масового обслуговування [1].

Функціонування довільної системи є сукупністю правил, яка визначає, що повинна робити система для досягнення поставленої перед нею мети; ці правила не обов'язково використовують знання побудови системи. Взагалі, відповідно до рівня абстракції, прийнятим при вивченні системи, її функціонування може описуватися більш-менш докладними правилами. Так, функціонування систем масового обслуговування зазвичай описується на рівні структури системи. Під структурою довільної системи розуміємо сукупність множини блоків (елементів) і множини зв'язків між ними. Структура системи обслуговування зазвичай зображується оргграфом, у якому вершини позначають блоки (елементи) системи, а дуги – напрямки руху робіт від блоку до блоку в процесі їх виконання [1, 2]. Для кількісної оцінки ступеня досягнення довільною системою поставленою перед нею мети вводять різні характеристики її функціонування. Кожна окрема характеристика оцінює якусь одну сторону функціонування системи, і лише всі разом вони дозволяють оцінити, наскільки система досягла поставлених цілей. Технологічні системи відносяться до детермінованих дискретних систем тому для розв'язання задачі оптимізації треба розробити відповідний алгоритм та скласти програму, що його реалізує.

Задача дискретної оптимізації при цілочисельних змінних формулюється так: визначити вектор оптимізуючих змінних  $X = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$ ;  $x_j \geq 0$ , який доставляє мінімальне значення цільовій функції  $\min f(X)$ ,  $X \in G$ , де  $G$  – кінцева множина припустимих значень вектора  $X$ .

Універсальним і розповсюдженим методом розв'язання цієї задачі, що має мінімальні вимоги до виду й властивостей цільової функції  $f(X)$  і обмежень, які задають множину припустимих рішень  $G$ , є метод гілок і меж [1, 2]. Алгоритм пошуку оптимального рішення  $X^*$ , для якого  $f(X^*) = \min f(X)$ ,  $X^* \in G$ , будують по наступній стандартній схемі.

Спочатку послідовно розбивають множину  $G$  на кінцеву кількість підмножин  $G_1^k, \dots, G_i^k, \dots, G_r^k$ ,  $i=1,2,\dots,r$ ,  $i = 1,2,\dots,r$ , де  $r$  – номер кроку. На кожному кроці перевіряють, чи містить дана підмножина  $G_i^k$  оптимальне рішення. Для цього обчислюють нижню границю (оцінку знизу)  $V(G_i^k)$  множини значень  $\{f(X), X \in G_i^k\}$ . Цю границю визначають, розв'язуючи оціночну задачу  $V(G_i^k) = \min f(X)$ ,  $X \in G_v$ , де  $G_i^k \subseteq G_v$ ). Множину  $G_v$  формують, або відкидаючи вимогу цілочисельності  $x_j$ , або частину обмежень, що задають  $G$ . Ефективність (трудомісткість обчислень і необхідний обсяг пам'яті) алгоритмів методу гілок і меж значною мірою залежить від способів визначення границь і стратегії розгалуження, вибір яких істотно опирається на специфіку конкретної задачі. Метод гілок і меж також доцільно використовувати при оптимізації маршруту обробки складних корпусних деталей, при багатоваріантній обробці поверхонь деталі, визначенні оптимальної послідовності обробки отворів тощо, які можна представити в вигляді орієнтованого графу, тощо.

Аналіз технологічних процесів складання дозволив визначити основні задачі автоматизації проектування технології механоскладальних робіт та формалізації процесу проектування технології складання виробів.

Виконаний аналіз інформаційних зв'язків та враховуючи особливості технології складання виробів приладобудування дозволив розробити основи класифікації та групування, створити алгоритм класифікації та інформаційну модель технологічних процесів механоскладальних робіт.

Розроблені інформаційні моделі виробів приладобудування та технології їх складання дозволяють створити узагальнені маршрути



складання приладів відповідної класифікаційної групи та представити алгоритм формування операцій складання конкретного приладу.

В результаті промислового використання підтверджено, що розроблені методика проектування технологічних процесів складання та автоматизована система проектування технологічних процесів виробів може використовуватись, як самостійно, так і в комплексі з система конструювання виробів і їх твердотільного моделювання та автоматизованими системами виконання інженрних розрахунків.

### **Література**

1. Мазур, М.П. Основи теорії різання матеріалів : підруч. / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.

2. Вислоух, С. П. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи : підруч. для здобувачів ступ. бакалавра за спец. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / С.П. Вислоух, О.В. Волошко, Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 228 с.

*Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О.*  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», Харків  
*Рябченко С.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ПЕРСПЕКТИВА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКІСНОГО АБРАЗИВНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

При зубошліфуванні загартованих циліндричних зубчастих коліс утворюються залишкові напруги механічного та теплового характеру. У разі теплової моделі при зубошліфуванні утворюються залишкові напруги, що розтягують. Розтягуючі напруги знижують експлуатаційні властивості загартованих циліндричних зубчастих коліс і можуть призвести до виникнення мікротріщин [1].

Мікротрешини з'являються також у результаті, перш за все, високої тимчасової температури шліфування – понад точки  $A_{c3}$ , а також структурних змін, що відбуваються в поверхневому шарі під впливом різниці температур у мікрообластях оброблюваного матеріалу. Коли величина залишкових напруг перевищують межу міцності матеріалу, що обробляється, тоді відбувається процес мікро-розтріскання поверхневого шару. Це явище свідчать про концентрацію залишкових напруг і високу їх інтенсивність. У теорії утворення термонапруг крайові початкові завдання аналізувалися у просторах гладких функцій методами: інтегральних перетворень, інтегральних рівнянь, гільбертового простору та варіаційної нерівності.

Істотним є те, що швидкість температурних змін нерівномірна за перерізом оброблюваного матеріалу зуба зубчастого колеса. Тому нерівномірні об'ємні зміни у матеріалі сприяють появі залишкових напруг. Причиною виникнення термонапруг є нерівномірне охолодження, нагрівання нижче температури  $A_1$  і пов'язана з цим теплова розширюваність. Структурні напруги викликаються зміною обсягу мартенситно - аустенітних перетворень при переході через інтервал критичних температур (наприклад, аустеніт, перліт, мартенсит, бейніт). Тому посилення дифузії у твердих тілах спостерігається лише у певному інтервалі середніх температур, а високих температурах переважають ефекти, викликані тепловими коливаннями. Ефект Сорета вказує, що потік матерії у будь-якій системі залежить від градієнта концентрації та температури. Зростання напруг, що розтягують, викликаний тепловим впливом веде до зниження втомної міцності, що вимагає створення абсолютно нових підходів до чистової обробки зубчастих коліс. Одним з напрямків є розробка та дослідження швидкісного абразивного зубофрезерування загартованих циліндричних зубчастих коліс, що дозволить знизити залишкові розтягувальні напруги з переходом їх до напруг стиснення та значно зменшити ймовірність утворення мікротріщин у поверхневому шарі та підвищити довговічність загартованих циліндричних зубчастих коліс.

## Література

1. Hasanov, Magomed. 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 // Inter. J. of Integrated Eng. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 55–62,

*Гасанов М. І., Клочко О.О., Пермяков О.А.*  
Національний технічний університет «ХПІ», Харків,  
*Рябченко С.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

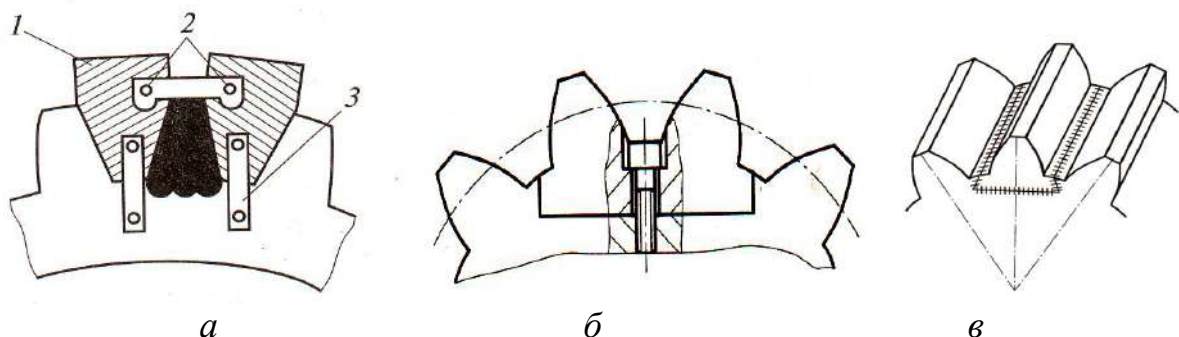
Неодноразово робилися спроби розробки процесів відновлення зубчастих коліс приводу рудорозмельних млинів. Причиною цього є відносно малий термін служби коліс, які працюють в агресивно абразивному середовищі, висока вартість і трудомісткість їх виготовлення. Теоретично, при такому великому числі зубів (200–220), зношені колеса можна «перенарізати» з негативним зміщенням інструменту не отримавши підрізу зуба [1, 2]. Однак, враховуючи, що при реальній роботі з урахуванням реверсу зуб зношується значно і по обидва боки, зміщення повинно складати близько 40 мм, що неприпустимо зменшить переріз і міцність основи вінця. Відновлення зубів наплавленням під шаром флюсу нетехнологічно через малу довжину наплавлюваних валиків і необхідності після накладання кожного валика ретельної зачистки його від шлаку. Застосування електрошлакового наплавлення зубів з використанням мундштука, що плавиться, за свідченням самих розробників процесів для крупногабаритних коліс проблематично через їх суттєву деформацію. Запропоновано наплавляти зношені зуби в середовищі вуглекислого газу з наступною механічною обробкою. За фактом вінцеві колеса виготовляють з литої середньовуглецевої сталі з вмістом вуглецю 0,4–0,5%. При такому вмісті вуглецю через швидке нагрівання і охолодження і негомогенності аустеніту в зоні термічного впливу при накладенні першого валика можлива поява гартівних структур з високою твердістю і низькою пластичністю. При накладенні наступних валиків температура нагріву цієї зони не вище критичної, тому перекристалізації не відбувається, а ефект відпустки проявляється слабо. Дослідження мікроструктури і мікротвердості в процесі експериментального підбору режиму наплавлення підтвердило, що при неоптимальних режимах в зоні термічного впливу можуть з'являтися ділянки товщиною до 0,3 мм і довжиною до 5 мм з твердістю понад 300–500 НВ. Режим наплавлення першого валика і час накладання наступного підбирався так, щоб появу гартівних структур виключити. Забезпечити цю умову можна, якщо перед накладенням

другого валика температура ділянки зони термічного впливу поруч з лінією сплаву не буде нижчою температури початку мартенситного перетворення. Нагрівання подальшими валиками забезпечить розпад аустеніту з утворенням феррито-перлітної структури. Наплавлення виробляли напівавтоматом А-537 з джерелом живлення ВДУ-505. Використовувався дріт СВ 08Г2С діаметром 1,6 мм. Режим наплавлення: напруга 26 В; зварювальний струм (250–300) А; швидкість наплавлення близько 230 м/год. Після наплавлення зуби обробляли переносним верстатом, встановлюваному на колесі. За даною процесів було відновлено двадцять дев'ять зубчастих коліс кульових млинів діаметром більше чотирьох метрів. Експлуатація показала, що термін служби відновлених коліс в умовах реального виробництва того ж порядку такий же самий, що і нових.

Відновлення зубчастих коліс здійснюється декількома способами в залежності від характеру зношування.

Зубчасті колеса зі зламаним або викришуваним зубом недоцільно залишати в працюючому механізмі, так як це може привести до поломки зубів сполученого колеса і виходу з ладу всього механізму. У відповідальних швидкохідних передачах такі зубчасті колеса підлягають заміні. У тихохідних зубчастих передачах економічно вигідніше направити таке зубчасте колесо на відновлення.

Відновлення зубчастих коліс зі зламаним або викришеним зубом може бути виконано в такий спосіб: наплавленням нового зуба замість зношеного по мідним шаблонам (рис. 1, а), встановленням вставки, що закріплюється гвинтом (рис. 1, б), встановленням вставки в паз типу «ластівчин хвіст» з подальшим її закріпленням зварюванням (рис. 1, в).



**Рис. 1. Відновлення зубчастих коліс зі зламаним або викришеним зубом:**  
 1 – мідні шаблони, що забезпечують можливість формування бокової поверхні зуба; 2, 3 – планки, що фіксують положення шаблонів на зубчастому вінці

Після наплавлення шаблони легко видаляються, так як метал, який наплавляється, не приварюється до мідних шаблонів через високу теплопровідність міді.

Відновлення коліс здійснюється шляхом попереднього наплавлення на зношену поверхню металу, міцнісні характеристики якого повинні відповідати характеристикам тіла відновлюваних зубів колеса. Наплавленню передують прогрів тіла колеса до заданої температури, яка забезпечує необхідний ступінь адгезії металу колеса з шаром наплавлюваного металу. Після наплавлення на зубообробному обладнанні відновлюють профіль зубів до проектних розмірів.

Недоліком даного способу є те, що застосування будь-якого виду наплавлення не гарантує формування необхідної кристалічної структури наплавляемого металу. Висока температура наплавлення впливає на формування певної кристалічної решітки наплава, яка, як правило, відрізняється від кристалічних решіток тіла колеса, з якого складається зношений зуб колеса. Крім того, при невідповідності температур тіла колеса і наплавляемого металу погіршуються умови адгезії, порушується цілісність кристалічних решіток і, відповідно, знижуються міцнісні властивості колеса в цілому.

Виконання ремонту шляхом попереднього наплавлення на зношену поверхню металу не дозволяє значно продовжити термін експлуатації колеса і надалі вимагає повторного виконання відновлювальних робіт або його утилізацію. Це підвищує собівартість металургійної сировини, знижує економічну ефективність гірничо-збагачувального виробництва.

Відновлення великогабаритних коліс здійснюється за рахунок відновлення профілю і параметрів зубів, який досягається формуванням поновлюваного зуба за рахунок видалення його зношеної і деформованої частини і формуванням його нижньої частини за рахунок частини тіла колеса.

Відновлення крупногабаритних коліс полягає в наступному:

- в збереженні параметрів зубів шестерні і їх заданих фізико-механічних властивостей;
- в запобіганні зміни фізико-механічних властивостей відновлених зубів і забезпеченні їх нормального експлуатаційного ресурсу;
- в зниженні експлуатаційних витрат і зменшенні собівартості продукції, яка переробляється, за рахунок повторного використання крупногабаритної шестерні з повним робочим ресурсом.

В процесі експлуатації крупногабаритного гірничо-збагачувального обладнання, наприклад, млинів різного ступеня подрібнення, відбувається природний експлуатаційний знос їх конструктивних елементів. Тіла обертання приводяться в рух за рахунок взаємодії крупногабаритних шестерень, взаємодіючих з приводами. Протягом терміну експлуатації відбувається регламентний знос коліс.

Знос зубів може бути односторонній, якщо обертання колеса відбувається в одному напрямку. Знос зубів може бути двостороннім, якщо передбачається розворот шестерні і стираючі навантаження докладаються на обидва бічних профілю кожного зуба шестерні.

Спосіб відновлення зношеної зубчастої частини крупногабаритної шестерні розглядається на прикладі відновлення шестерні, де знос зубів відбувається з одного боку, тобто при наявності робочого і неробочого профілів кожного зуба.

### **Література**

1. Gasanov, M. New strength for recovery of geared circles / M. Gasanov, A. Permyakov, A. Klochko, A. Shelkovoy // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Techniques in a machine industry : ST. sciences. pr.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2020.– № 2 (2).– S. 3–9.

2. Hasanov, Magomed. 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 // Inter. J. of Integrated Eng. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 55–62.

*Геворкян Е.С., Мартиросян С.Р., Пліщенко П.В.*

Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків, Україна

## **ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ FERROTITANITE-S**

Ферротитаніт-S – складний в обробці матеріал, який отримують методами порошкової металургії. Як правило, це суміш TiC (45 об.%) і Fe (55 об.%). До складу сталевих матриць входять феритно-перлітні або нікель-мартенситні зерна. Цей матеріал може вико-

ристовуватися в якості інструментального матеріалу, а також для виготовлення різних зносостійких деталей.

Твердість ферротитаніту – 69 HRC, щільність – 6,5 г/см<sup>3</sup>. Метод отримання ферротитаніту методами порошкової металургії дозволяє уникнути утворення волокнистої, фактурної структури і, крім того, дозволяє уникнути сегрегації, забезпечуючи при цьому високу щільність, міцність і твердість. Матеріал легко піддається високо-температурному відпуску і має низький відсоток теплового розширення. Вбудована в структуру сталева матриця абразивні зерна карбїду титану значно ускладнюють обробку звичайними лезовими інструментами через швидке абразивне зношування. Як правило, матеріал оброблявся твердосплавними пластинами зі зносостійким покриттям виробництва Sandvik Coromant. Були використані наступні дані різання: швидкість різання – 8 м/хв, подача – 0,05–0,10 мм/об, глибина різання – 1 мм.

Інструментальний матеріал монокарбїду вольфраму, який отримують з монокарбїдних нанопорошків вольфраму, методом монокарбїду вольфраму методом SPS (Spark Plasma Sintering) [1–3], має високу твердість і зносостійкість, у порівнянні з інструментальними матеріалами на основі кубічного нітриду бору. Обробку ферротитаніту-S вольфрамовою монокарбїдною пластиною проводили при низьких швидкостях різання  $V = 10, 20$  та  $40$  м/хв, подачі  $S = 0,1$  м/хв та глибині різання  $t = 0,2$  мм. Знос вимірювали за допомогою оптичного мікроскопа МРМ-8. Найбільша інтенсивність зносу вставок на задній поверхні спостерігалася при токарній обробці зі швидкістю  $40$  м/хв, найбільша міцність при  $10$  м/хв. – 25–26 хв для однієї ріжучої кромки. Пластина SNMG 150612-23 H13A (Sandvik Coromant) передній кут –  $5^\circ$ , задній кут  $50^\circ$  SNUN 120408 (WC-SPS) передній кут –  $5^\circ$ , задній кут –  $5^\circ$ . При механічній обробці імпорнтними твердосплавними пластинами з покриттями, що не переточуються, через виникнення сильного абразивного впливу оброблюваного матеріалу на поверхню покриття відбувається інтенсивне зношування, особливо при обробці на відносно високих швидкостях різання. Високий термін служби інструменту 35–38 хв. для однієї ріжучої крайки. Слід зазначити, що при використанні змащувально-охолоджуючих рідин довговічність твердосплавних пластин збільшується від 20 до 40%. Використання охолоджуючої рідини дозволяє уникнути утворення наросту, але в цьому випадку утворюється виражений знос, що в кінцевому резуль-

таті призводить до викришування ріжучої крайки з площею зносу більше 0,8 мм на задній поверхні. При швидкості різання 40 м/хв. і більше знос вольфрамових монокарбідних пластин, ймовірно, є абразивно-дифузійним. Це можна пояснити утворенням на передній поверхні невеликого гнізда зносу, яке відокремлене незношеною колодкою від ріжучої кромки. Дослідження впливу форми і розмірів випробуваних вставок показали, що термін довговічності за критерієм допустимого зносу для різних вставок має аналогічну залежність від глибини різання. Подача в діапазоні від 0,05 до 0,1 мм/об практично не впливає на знос випробувальних пластин. Однак при збільшенні швидкості подачі більш ніж на 0,1 мм/об змінюється схема поділу стружки. Зокрема, при механічній обробці пластинами з монкарбіду вольфраму збільшується довжина стружки руйнування і зчеплення один з одним, що створює видимість зливної стружки. Мабуть, це пов'язано з більш низьким коефіцієнтом тертя між передньою поверхнею інструменту і оброблюваним матеріалом. У випадку з іншими випробуваними інструментальними матеріалами такого ефекту не спостерігається, навіть у разі застосування охолоджуючої рідини. Таким чином, випробування показали, що новий інструментальний матеріал на основі монокарбіду вольфраму має досить високу зносостійкість і є перспективним для обробки важкооброблюваних матеріалів, зокрема, ферро-титаніту-S.

### **Література**

1. Kodash, V.Y. Tungsten carbide cutting tool materials / V. Y. Kodash, E. S. Gevorkian // United States Patent 6,617,271.
2. Groza, J.R. ASM Handbook Powder Metallurgy / J. R. Groza. – 1998. – Vol. 7, 7. – 583 p.
3. Tokita, M. Mechanism of Spark Plasma Sintering / M. Tokita. – Sumitomo Coal Mining Company, Japan, preprint. – P. 1–14.



*Гопкало О.Є., Рутковський А.В.* Інститут проблем  
міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,  
*Антонюк В.С.* Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## **ВПЛИВ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ТА ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ 40ХН2МА**

Основою будь-якого промислового виробництва є технологічні процеси, що забезпечують високу продуктивність, надійність, якість і ефективність виготовлення виробів. На сучасному етапі розвитку виробництва особливе значення набувають прогресивні високопродуктивні способи та методи підвищення зносостійкості елементів машин та механізмів, одним з яких є йонно-плазмове термоциклічне азотування (ЙПТА), яке відповідає сучасним вимогам виробництва [1].

Проблеми розвитку вітчизняного машинобудування в сучасних умовах нерозривно пов'язані з освоєнням нових наукомістких технологій, що забезпечують ресурсозбереження, експлуатаційну надійність продукції.

Нова енергозберігаюча технологія хіміко-термічного зміцнення деталей машин та інструментів стосовно до йонного азотування створена в інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. Розроблена технологія термоциклічного йонного азотування відрізняється тим, що нагрівання зміцнюючих деталі здійснюється тільки поверхневим підведенням енергії тліючого розряду [2].

Обробка проводиться у вакуумній камері при відсутності конвективних втрат тепла шляхом циклічної подачі енергії тліючого розряду. У розрідженому вакуумному газовому середовищі, що складається з азоту і аргону, між катодом (деталь) і анодом (стінка вакуумної камери) збуджується циклічний тліючий розряд керованої потужності.

Повною мірою це стосується виробництва високоякісних трубчастих виробів спеціального призначення, і, особливо, зі складним профілем внутрішньої поверхні. Виходячи з жорстких експлуатаційних вимог щодо таких виробів оптимальними для їх виготовлення є конструкційні леговані сталі.

В інженерній практиці для виготовлення зносостійких деталей, в яких особливу роль відіграють поверхневі шари, широке застосування знайшли сталі типу 40ХН2МА [3].

Особливі умови експлуатації виробів спеціального призначення потребують удосконалення технологічних процесів їх виготовлення.

Проведено серію досліджень впливу режимів термічної та хімікотермічної обробки на твердість та глибину поверхневого шару циліндричних заготовок з прутка зі сталі 40ХН2МА діаметром 30мм з метою досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей. Температура критичних точок для сталі 40ХН2МА:  $A_{c1} = 730\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3}(A_{cm}) = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r3}(A_{rcm}) = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r1} = 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Об'єктами металографічних досліджень є зразки з циліндричних заготовок, вирізаних з прутків ( $\varnothing 30\text{ мм}$ ) зі сталі 40ХН2МА у стані поставки (вихідний стан), після термічної обробки та хімікотермічної обробки – вакуумне іонно-плазмове азотування або карбонітрування попередньо термічнооброблених зразків.

Термічну обробку зразків зі сталі 40ХН2МА проводили, в два етапи: гартування від температури  $850 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  та високий відпуск при температурі  $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , виходячи зі значень температур критичних точок  $A_{c3}$  та  $A_{r3}$  для сталі 40ХН2МА. При розрахунку часу на нагрівання та витримку при гартуванні і високому відпуску в процесі підбору оптимального режиму термічної обробки користувались різними інженерними підходами.

Заключну та хімікотермічну обробку проводили методом вакуумного іонно-плазмового азотування за різними режимами на попередньо термічно оброблених зразках [4].

Хімікотермічну обробку виконували методом вакуумного іонно-плазмового карбонітрування при температурі  $520\text{--}530\text{ }^{\circ}\text{C}$  за режимом: витримка  $\tau_b = 16\text{ год}$ ; тиск  $P = 47\text{--}50\text{ Па}$ , в робочому середовищі:  $Ar = 0,85$ ;  $C_3H_8 = 0,1$ ;  $N_2 = 0,25$ .

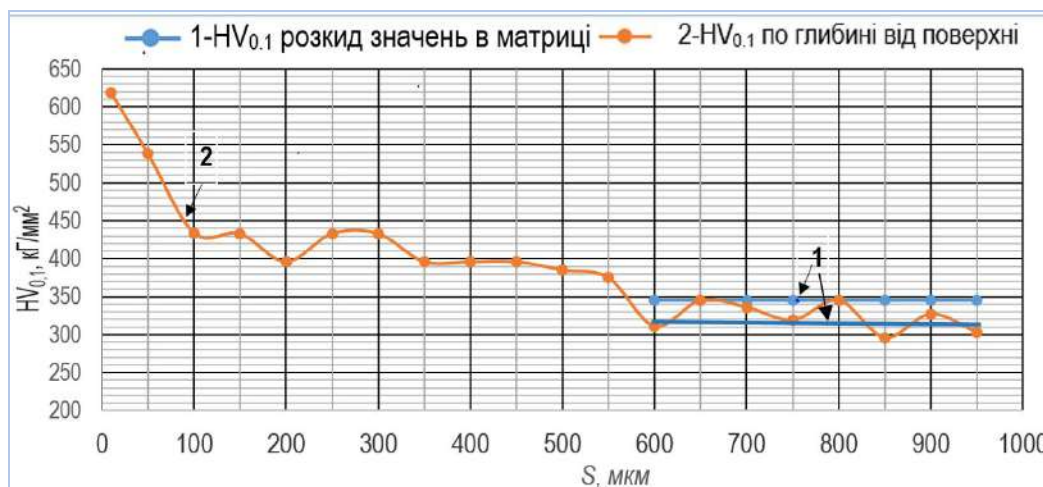
На рис. 1 показано результати дюрOMETричного аналізу металу зразка зі сталі 40ХН2МА після хімікотермічної обробки (методом вакуумного іонно-плазмового карбонітрування).

В результаті експериментальних досліджень зразка зі сталі 40ХН2МА отримали стан поверхневого шару з боку хімікотермічної обробки  $85\text{ HRN}_{15}$  (49 HRC) і основи матеріалу  $77\text{ HRN}_{15}$  (34 HRC).

**Висновки.** Як показали експериментальні дослідження запропонована сталь 40ХН2МА добре піддається модифікації поверхневого шару методом термічної і хімікотермічної обробки.

Застосування йонно-плазмового термоциклічного азотування дозволило отримати глибокі шари у високій твердості поверхневого шару, що підтверджує ефективність використати метод

термічної і хімікотермічної обробки легованих сталей у складних деталях машин та механізмів.



**Рис. 1 – Графічне відображення результатів дюрOMETричного аналізу металу зразка зі сталі 40ХН2МА після хімікотермічної обробки;  $HV_{0,1}$  – розподіл мікротвердості по глибині ( $S$ ) від лицьової поверхні зразка. 1– межа твердості основного матеріалу, 2 – глибина від поверхні**

## Литература

1. Ляшенко, Б.А. Застосування йонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковський, В.С. Антонюк і др. // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2015. – Вип № 3 (74). – С. 28–33.

2. Рутковський, А.В. Дослідження напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості методом кінцево-елементного аналізу / А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта // Центрально-укр. наук. вісник. Техн. науки. – 2022. – Кропивницький ЦНТУ, 2022. – Вип. 6(37), ч. 1. – С. 3–9.

3. Kaplun, P.V. Microstructure and wear resistance of modified surfaces obtained by ion-plasma nitriding of 40ХН2МА steel / P.V. Kaplun, A.V. Rutkovskiy // Problems of Tribology. – 2022. – Vol. 27, № 3/105. P. 89–95.

4. Рутковський, А.В. Підвищення ресурсу матриць для гарячої ковки з допомогою технології ПТА / А.В. Рутковський, В.С. Антонюк // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті : мат. 23-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 15–16 березня 2023 р., м. Київ. – Київ : АТМ України, 2023. – С. 101–103.

Даниленко Ю.А. Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
Грінченко Г.С. Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Україна

## МІЖНАРОДНИЙ КОМІТЕТ ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ІЕС SC 45А «АПАРАТУРА, КЕРУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК»

Стандарти ІЕС SC 45А Instrumentation, control and electrical power systems of nuclear facilities – охоплюють увесь життєвий цикл цих контрольних-вимірювальних приладів, систем керування та електроенергії, від концепції до проектування, виробництва, випробувань, встановлення, введення в експлуатацію, експлуатації, технічного обслуговування, управління старінням, модернізації та виведення з експлуатації. Основною сферою комітету є контрольні-вимірювальні прилади, системи керування та електроживлення, важливі для безпеки на об'єктах виробництва ядерної енергії. Основна мета комітету полягає у забезпеченні високого рівня безпеки, надійності та ефективності систем контролю, вимірювання та керування, які використовуються на ядерних об'єктах. Для реалізації цієї мети, з урахуванням сучасних вимог у сфері атомної енергетики міжнародним комітетом зі стандартизації ІЕС SC 45А постійно розробляються, переглядаються та оновлюються стандарти. Наразі в комітеті в роботі знаходяться 22 робочих проєктів міжнародних стандартів (табл. 1) [1].

**Таблиця 1 – Проєкти міжнародних стандартів**

Номер проєктного документу/Діюча в Україні версія/Діюча версія міжнародного стандарту ІЕС	Назва проєкту стандарту (укр.)	Назва проєкту стандарту (англ.)
1	2	3
<b>Перегляд та оновлення діючих міжнародних стандартів ІЕС</b>		
ІЕС 60880 ED3	Атомні електростанції. Інформаційні та керувальні системи, важливі для безпеки. Програмні аспекти комп'ютерних систем, які виконують функції категорії А	Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category A functions
ДСТУ ІЕС 60880:2008 (ІЕС 60880:2006, IDT)		
ІЕС 60880:2006		

1	2	3
IEC 60911 ED2 IEC 60911:1987	Атомні електростанції. Системи контрольно-вимірювальних приладів. Вимірювання для контролю адекватного охолодження всередині активної зони легководних реакторів під тиском	Nuclear Power Plants – Instrumentation systems – Measurements for monitoring adequate cooling within the core of pressurized light water reactors
IEC 60951-2 ED3 IEC 60951-2:2009	Атомні електростанції- Прилади, важливі для безпеки- Радіаційний моніторинг аварійних і післяаварійних умов. Частина 2. Обладнання для безперервного автономного моніторингу радіоактивності в газоподібних викидах і вентиляційному повітрі	Nuclear Power Plants – Instrumentation important to safety – Radiation monitoring for accident and post-accident conditions – Part 2: Equipment for continuous off-line monitoring of radioactivity in gaseous effluents and ventilation air
IEC 60951-4 ED3 IEC 60951-4:2009	Атомні електростанції. Прилади, важливі для безпеки. Радіаційний моніторинг аварійних та післяаварійних умов. Частина 4. Обладнання для безперервного поточного або оперативного моніторингу радіоактивності в технологічних потоках	Nuclear power plants – Instrumentation important to safety - Radiation monitoring for accident and post-accident conditions – Part 4: Equipment for continuous in-line or on-line monitoring of radioactivity in process streams
IEC 61225 ED4 ДСТУ EN IEC 61225:2022 (EN IEC 61225:2020, IDT; IEC 61225:2019, IDT) IEC 61225:2019	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади, системи керування та електроенергії. Вимоги до статичних систем безперебійного живлення постійного та змінного струму	Nuclear power plants – Instrumentation, control and electrical power systems – Requirements for static uninterruptible DC and AC power supply systems
IEC 61227 ED3 ДСТУ EN 61227:2022 (EN 61227:2016, IDT; IEC 61227:2008, IDT) IEC 61227:2008	Атомні електростанції – Пункти управління –Органи операторського керування	Nuclear power plants – Control rooms – Operator controls
IEC 61250 ED2 IEC 61250:1994	Ядерні реактори. Контрольно-вимірювальні прилади та системи керування, важливі для безпеки. Виявлення витoku в системах теплоносія	Nuclear reactors – Instrumentation and control systems important for safety – Detection of leakage in coolant systems

1	2	3
IEC 61513 ED3 ДСТУ EN 61513:2022 (EN 61513:2013, IDT; IEC 61513:2011, IDT) IEC 61513:2011	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади та керування, важливі для безпеки. Загальні вимоги до систем	Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – General requirements for systems
IEC 61888 ED2 IEC 61888:2002	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади, важливі для безпеки. Визначення та підтримка заданих значень спрацьовування	Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Determination and maintenance of trip setpoints
IEC/IEEE 62582-1 ED2 IEC/IEEE 62582-1:2011	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади та контроль, важливі для безпеки. Методи моніторингу стану електричного обладнання. Частина 1. Загальні положення	Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 1: General
IEC/IEEE 62582-3 ED2 IEC/IEEE 62582-3:2024 PRV	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади та контроль, важливі для безпеки. Методи моніторингу стану електричного обладнання. Частина 3. Подовження при розрив	Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 3: Elongation at break
IEC/IEEE 62671 ED2 IEC 62671:2013	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади та контроль, важливі для безпеки. Вибір і використання промислових цифрових пристроїв обмеженої функціональності	Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Selection and use of industrial digital devices of limited functionality
IEC 63147 ED2 IEC 63147:2017	Стандартні критерії контрольно-вимірювального обладнання	Standard criteria for accident monitoring instrumentation Criteria for accident monitoring instrumentation for nuclear power generating stations
<b><i>Розробляється вперше</i></b>		
IEC 63272 ED1	Атомні установки – Електроенергетичні системи – Системи безперебійного електропостачання змінного струму	Nuclear facilities – Electrical power systems – AC interruptible power supply systems.

1	2	3
IEC 63298 ED1	Атомні електростанції – Електроенергетичні системи – Координація та взаємодія з електричною мережею	Nuclear power plants – Electrical power systems – Coordination and interaction with electric grid
IEC/IEEE 63332– 387 ED1	Атомні установки – Електроенергетичні системи – Дизель-генераторні установки, що використовуються як резервні джерела живлення	Nuclear facilities – Electrical power systems – Diesel generator units applied as standby power sources
IEC 63351 ED1	Ядерні установки – Інженерія людського фактора – Застосування до розробки інтерфейсів людина-машина	Nuclear facilities – Human factors engineering – Application to the design of human machine interfaces
IEC 63374 ED1	Атомні електростанції. Системи контрольно-вимірювальних приладів, важливі для безпеки. Характеристики та методи випробування вимірювача реактивності ядерного реактора	Nuclear power plants – Instrumentation systems important to safety – Characteristic and test methods of nuclear reactor reactivity meter
IEC 63413 ED1	Атомні електростанції – Контрольно-вимірювальні прилади та системи керування, важливі для безпеки – Кваліфікація платформи	Nuclear Power Plants – Instrumentation and control systems important to safety – Platform qualification
IEC 63423 ED1	Атомні електростанції. Контрольно-вимірювальні прилади та системи керування, важливі для безпеки. Кабельні вузли для суворих навколишніх умов	Nuclear Power Plants – Instrumentation and control systems important to safety – Cable assemblies for Harsh Environment Purposes
IEC 63435 ED1	Атомні електростанції – Пункти управління – Системи підтримки оператора	Nuclear power plants – Control rooms – Operator support systems
IEC TR 63486 ED1	Ядерні об'єкти – Контрольно-вимірювальні прилади, системи керування та електропостачання – Підходи до управління ризиками кібербезпеки	Nuclear Facilities – Instrumentation, control and electrical power systems – Cybersecurity risk management approaches

Серед проектів міжнародних стандартів, що розробляються вперше окрему увагу хотілось би звернути до нормативних документів, які по'язані з інтеграцією та забезпечення безпеки в

системі «людина-машина», що є перспективним напрямком розвитку в галузі атомної енергетики та включає в себе автоматизацію, інформаційні технології та інтерфейси користувача для забезпечення безпеки та ефективності роботи ядерних об'єктів, а саме забезпечення безпеки інтегрованих систем керування та моніторингу, які включають різноманітні технології штучного інтелекту. Ці системи можуть автоматизувати та оптимізувати процеси управління, а також забезпечувати операторам більше інформації для прийняття рішень. Стандарти ІЕС 63435 ED1 та ІЕС 63351 ED1 мають на меті регулювання безпеки та ефективності інтегрованих систем управління атомними електростанціями з використанням передових технологій та інтерфейсів користувача. Такі стандарти допомагають забезпечити високий рівень безпеки та ефективності у галузі атомної енергетики в умовах зростаючого використання сучасних технологій.

Іншим спорідненим актуальним напрямком забезпечення безпеки на який вартує звернути увагу в якості об'єкту стандартизації у сфері атомної енергетики є кібербезпека та ризики, які з цим пов'язані. Проект нормативного документу ІЕС TR 63486 ED1 (Technical Report) стосується кібербезпеки та управління ризиками, що пов'язані з кібербезпекою на об'єктах атомної енергетики, зокрема роботою контрольно-вимірювальних приладів, систем керування та електропостачання. Основна мета цього технічного звіту полягає в тому, щоб надати рекомендації та підходи до управління ризиками кібербезпеки в контексті ядерних об'єктів. Згідно з цим документом, важливо розглядати кібербезпеку як невід'ємну складову частину безпеки ядерних установок. ІЕС TR 63486 ED1 є важливим інструментом для розробників, операторів та регулюючих органів у сфері ядерної енергетики для забезпечення безпеки та надійності в умовах зростаючої кіберзагрози.

ТК 99 «Матеріали та прилади для сцинтиляційної техніки та техніки, пов'язаної з вимірюванням іонізуювальних випромінень» більш ніж 20 років працює в групах ІЕС ТС 45/SC 45А. Україна є активним членом у цьому комітеті, а саме ми може надавати зауваження та голосувати за проектами стандартів, що розробляє комітет, розробляти нові стандарти.

Відповідно до Закону України «Про стандарти, технічні регламенти та процедури оцінки відповідності» та виконання статей 26 і 124 Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, ратифікованої Законом України



від 16.09.2014 р. № 1678-VII, Міністерством економічного розвитку і торгівлі України видано Наказ № 1493 від 30.12.2014 р. «Про прийняття європейських та міжнародних нормативних документів як національних стандартів України, змін до національних стандартів України та скасування національних стандартів України», європейські та міжнародні нормативні документи приймаються в Україні як національні стандарти України методом підтвердження.

В зв'язку з вищезгаданим, запрошуємо всі зацікавлені організації долучатися до обговорення нових проектів стандартів або ставати керівниками у розробці нових проектів у робочих групах ІЕС ТС 45/SC 45А. Щоб отримати більш повну інформацію, прохання звертатися до заступника голови ТК 99 Даниленко Юлії (057) 3410292, j.danilenko@isma.kharkov.ua.

### **Література**

1. ІЕС-SC 45А Dashboard > Projects / Publications : Work programme, Up-to-date Project Plans, Publications, Stability Dates, Project files. Homepage. URL : <https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103> : 23 : 609597956493740::: FSP\_ORG\_ID, FSP\_LANG\_ID :1358, 25 (date of access: 15.03.2024).

*Девін Л.М., Ричев С.В., Нечипоренко В.М.,  
Грязев О.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА СКЛАДОВІ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ШХ15 РІЗЦЕМ ІЗ РСВН КОМПОЗИТИВ**

Точіння загартованих сталей найбільш продуктивно і якісно виконують інструментами з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (КНБ). Вони мають високу твердість, термостійкість, теплопровідність і хімічно інертні до залізвуглецевих сплавів [1]. Використання таких інструментів дозволяє при обробці загартованих сталей в 5–10 разів збільшити швидкість різання в порівнянні з твердосплавними різцями [2]. Але разом з тим процес різання загартованих сталей крихкими різцями на основі КНБ

часто супроводжується нестабільністю силових характеристик і високою температурою в зоні різання, що негативно впливає на працездатність інструментів і якість обробленої поверхні [3].

В останнє десятиріччя почали застосовувати двох стадійне спікання порошків кубічного нітриду бору (сBN) з алюмінієм в умовах високого тиску, що обумовило створення нових матеріалів з більш щільною структурою [4,5], які мають високі фізико-механічні характеристики [6]. Тому актуально перевірити ефективність обробки загартованих сталей інструментами, оснащеними новими PCBN композитами.

Метою даної роботи є дослідження впливу швидкості різання на складові сили при чистовому точінні загартованої сталі ШХ15 різцями з PCBN композитів.

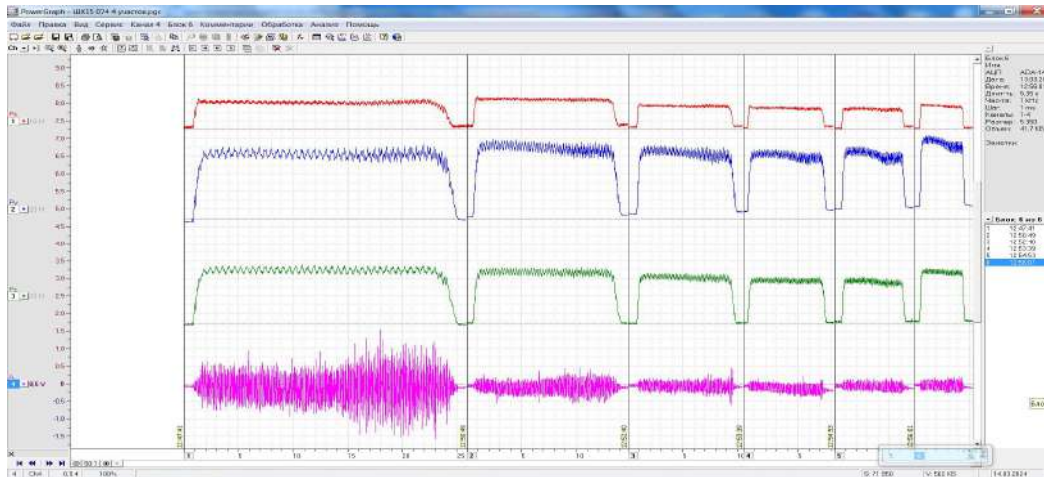
Враховуючи результати роботи [7] для досліджень було виготовлено зразок PCBN композиту, який був одержаний шляхом спікання порошків кубічного нітриду бору з алюмінієм при високому тиску. Вихідний порошок: кубічний нітрид бору марки КМ зернистістю 10/7 мкм виробництва концерну АЛКОН НАН України і порошок алюмінію марки АСД (фракція –40). Спікання проводили в сталевому апараті високого тиску "ковадло з заглибленням" з діаметром лунки 40 мм в дві стадії. Перша – при тиску 2 ГПа і температурі 1100 К просочування стисненого порошку сBN рідким алюмінієм на протязі 30 с; друга стадія – реакційне спікання сBN з Al при тиску 4,5 ГПа, температурі 1750 К на протязі 4 хвилин. Кількість алюмінію в шихті – 12,5% за об'ємом.

Отриманий зразок піддавали механічній обробці (шліфування вільним і зв'язаним абразивом) для очищення поверхні, отримання необхідної форми і розмірів зразків. Пластина після механічної обробки мала форму чотиригранної призми. Фазовий склад одержаного зразку визначали методом рентгеноструктурного аналізу.

Експериментальні дослідження виконували на автоматизованому стенді на базі токарного верстата з ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [8]. при чистовому точінні зразка загартованої сталі ШХ15 (діаметром  $d = 61$  мм) твердістю 55–58 HRC. Різець з механічним кріпленням квадратної різальної пластини з композиту (фазовий склад – 87% сBN + 10AlN+1% AlB<sub>2</sub>+1%Al) мав передній кут  $\gamma = -10^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 10^\circ$ .

Експериментальна серія складалася з шести дослідів. Подача на оборот  $S$  і глибина різання  $t$  у всіх дослідах були фіксовані і дорівнювали значенням:  $S = 0,1$  мм / об;  $t = 0,1$  мм. Зміна швидкості рі-

зання обумовлює зміну динамічних явищ при обробці, а також різну температури в зоні різання. Використовували дискретні значення швидкості різання в діапазоні  $v = 0,96\text{--}5,6$  м/с. Складові сили різання  $P_x$ ,  $P_y$  і  $P_z$  вимірювали за допомогою динамометра УДМ-300. Сигнали від динамометра по трьох каналах через підсилювач надходили на АЦП ADA-1406. Керування АЦП ADA-1406 здійснювалося програмою Power Graph. Осцилограми зміни сил різання наведені на рис. 1.



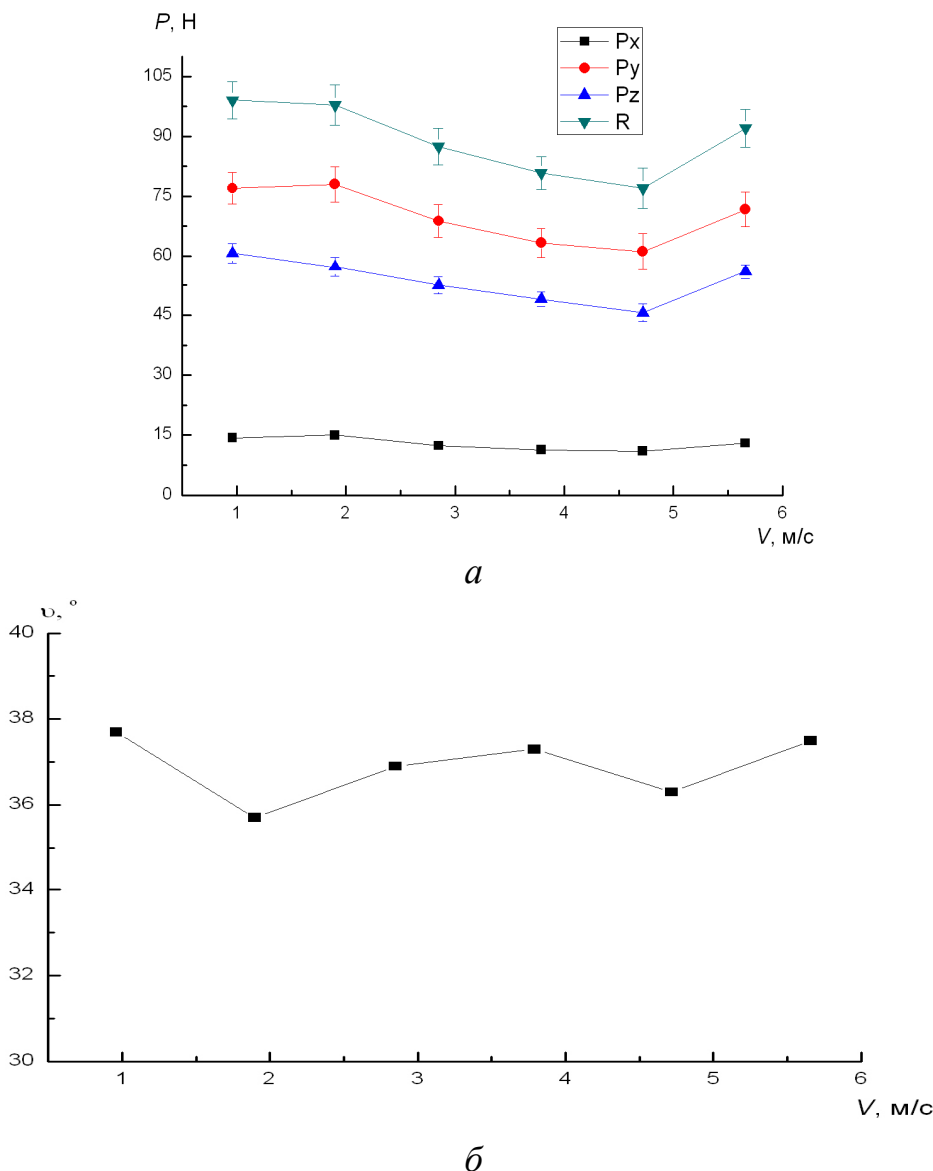
**Рис. 1 – Осцилограми 3 складових сили різання при частоті опитування 1 кГц**

Для кожного експерименту розраховані середні значення складових сили різання і будували залежності сил від швидкості різання (рис. 2, а).

За результатами вимірювання складових сил різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  розраховували кут прикладання сили різання (рис. 2, б):

$$v = \arctg \left( \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right).$$

Можна зробити висновок, що при чистовому точінні загартованої сталі ШХ15 пластиною з РСВН композиту, зі збільшенням швидкості різання  $v$  від 0,8 до 4,8 м/с (при подачі  $S = 0,1$  мм/об, глибині різання  $t = 0,1$  мм) середні значення складових  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , і рівнодіючої  $R$  сили різання зменшуються; кут прикладання сили різання залишається майже незмінним у всьому діапазоні швидкостей.



**Рис. 2 – Зміна середніх значень складових  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , і рівнодіючої  $R$  сили різання (а) та кута прикладання сили різання ( $\theta$ ) в залежності від швидкості різання  $v$**

### Література

1. Клименко, С.А. 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. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля; 2018. – 304 с.
2. Гриценко, Э.И. Точение никелевых сплавов инструментом из кубического нитрида бора / Э.И. Гриценко, П.Е. Дальник, В.И. Чапалюк. – К. : Наук. Думка, 1993/ – 108 с.
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : В 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. Т. 5. Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля; ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2006. – 316 с.

4. Стахнив, Н.Е., Динамические явления при чистовом точении закаленных сталей инструментом из композита на основе КНБ / Н.Е. Стахнив, Л.Н. Девин, И.А. Петруша, А.С. Осипов // Сверхтв. мат. – 2009. – №3. – С. 75–84/

5. Стахнив, Н.Е., Девин Л.Н Исследование влияния износа инструмента с композитом на основе КНБ на вибрации при чистовом точении закаленных сталей / Н.Е. Стахнив, Л.Н. Девин // Сверхтв. мат. – 2012 . – № 3. – С. 75–84.

6. Пат. 25281А, Україна, МКИ С04В35/5831. Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору / М.В. Новіков, О.О. Шульженко, М.П. Беженар, С.А. Божко. –Заявл. 21.07.97, Опубл. 25.12.98, Бюл. № 6.

7. Новиков, Н.В., Киборит: получение, структура, свойства, применение / Н.В. Новиков, А.А. Шульженко, Н.П. Беженар, С.А. Божко, А.И. Боримский, П.А. Нагорный // Сверхтв.мат.– 2001.– № 2.– С. 40–51

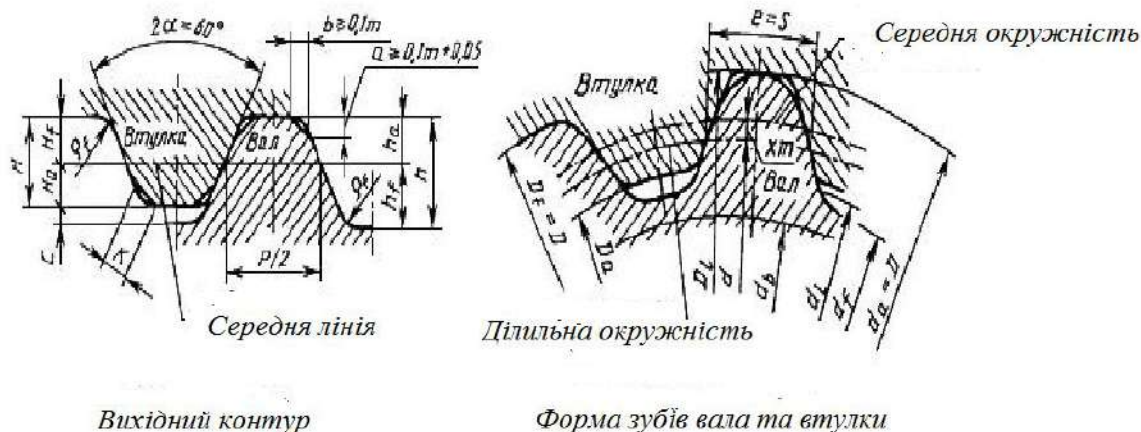
8. Девин, Л.Н. Інформаційно-вимірювальна система для дослідження процесу різання / Л.Н. Девин, Н.Е. Стахнив, В.П. Квасников // Вісник Інженерної академії України – 2013. – № 2. – С. 257–261.

*Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Набока О.В.,  
Степанова І.І., Храпов В.О.* Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна  
*Рябченко С.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

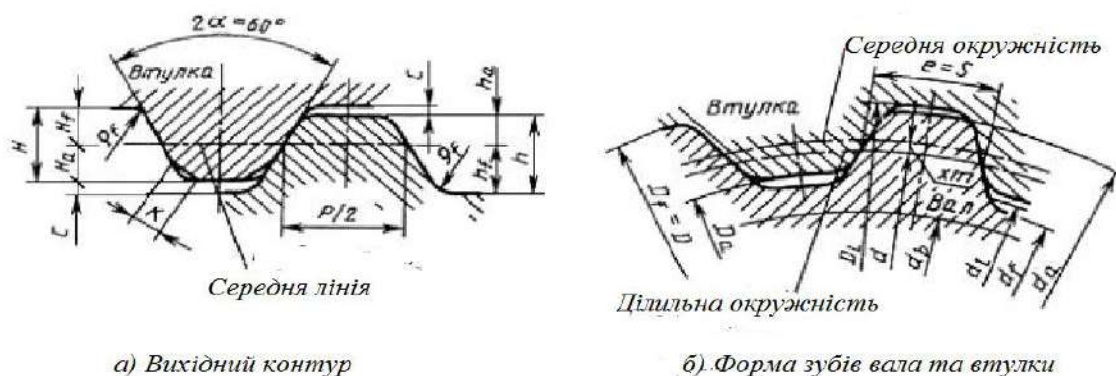
## **ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЕШЗ З МОДИФІКОВАНИМ ПРОФІЛЕМ**

Основним завданням при проектуванні технологічних процесів механічної обробки шліцьових поверхонь є забезпечення отримання готового виробу в межах норм стандарту ГОСТ6033 за призначеним ступенем точності виготовлення з мінімальною затратою матеріалу і праці, тобто мінімальними трудомісткістю і собівартістю. Розробка технології обробки залежить від конструкції шліцьового з'єднання, його зовнішньої форми, вихідного контура і форма зубів шліцьових з'єднань, технічних умов на виготовлення програми випуску [1].

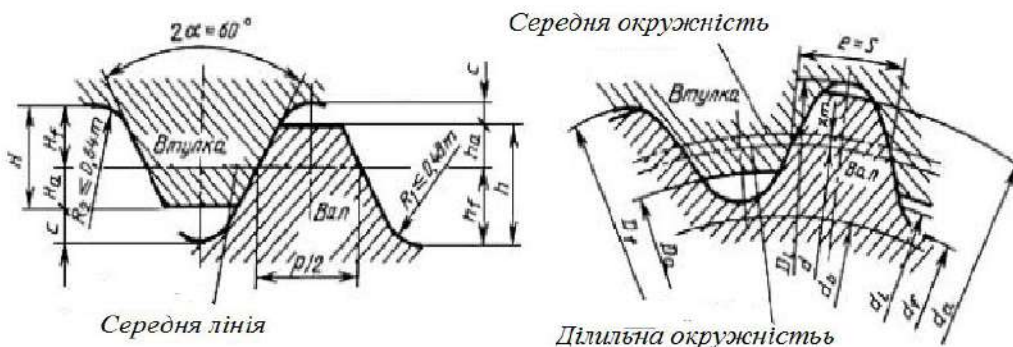
Вихідний контур і форма зубів шліцьових з'єднань і основні залежності для визначення їх розмірів повинні відповідати зазначеним на рис. 1–4 ГОСТ 6033. При centruванні по зовнішньому діаметру допускається застосовувати centruвання по внутрішньому діаметру з забезпеченням вимог допусків і посадок при centruванні по зовнішньому та внутрішньому діаметрам.



**Рис. 1 – Центрування по зовнішньому діаметру**



**Рис. 2 – Центрування по бокових поверхнях зубів (плоска форма дна западини)**



**Рис. 3 – Центрування по бокових поверхнях зубів (закруглена форма дна западини); centruвання по внутрішньому діаметру**

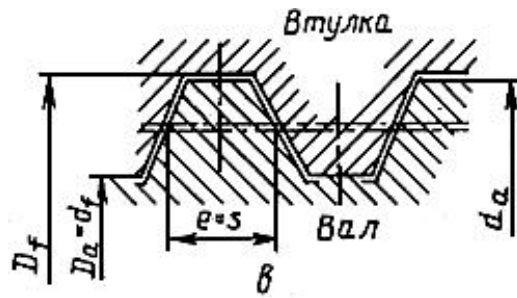


Рис. 4 – Центрування по внутрішньому діаметру

Імітаційне моделювання технології обробки великогабаритних евольвентних шліцьових з'єднань (ЕШЗ) з модифікованим профілем практично не залежить від послідовності виконання технологічних операцій, але залежить від застосовуваного інструменту та способів контролю ЕШЗ залежно від виду центрування. Також допускається застосовувати поєднання профілів зубів вала і втулки з різною формою дна западини. На поверхні вершин зубів вала, отриманих методом накатки, допускаються поглиблення. Найбільший вплив на структуру операцій в технологічному процесі мають рівень точності і шорсткість поверхні зубів, вид термічної обробки та ін. Підвищена точність викликає додаткові фінішні операції по обробці базових поверхонь заготовки, профілів зубів, а також впливає на режим обробки, якість технологічного оснащення і ріжучого інструменту.

Зубофрезерування черв'ячними фрезами є найпоширенішим і в більшості випадків найбільш ефективним методом обробки зовнішніх шліцьових поверхонь. Зубофрезерування забезпечує високу якість виготовлення шліцьових валів.

Цей спосіб, завдяки своїй універсальності допускає нарізування шліцьових евольвентних валів з різною кількістю зубів одним і тим же інструментом, високу точність процесу і продуктивність, має найбільше поширення в машинобудуванні. При додаткових пристосуваннях на зубофрезерних верстатах можна нарізати зубчасті колеса з бочкоподібною модифікацією зубів та багато інших деталей зі спеціальними профілями зубів, рівномірно розташованими щодо центру.

## Література

1. Ключко, О.О. Підвищення точності, якості та продуктивності обробки шліцьових поверхонь / О.О. Ключко, О.П. Старченко // Тр. 29-й Международ. конф. «Новые технологи и в машиностроении», 2–8 сентября 2019 г., г. Коблево. – Харьков : НАКУ «ХАИ». – 2019. – С. 5.

*Зяхор І.В., Левчук А.М., Шило Ю.А.,  
Завертанний М.С., Кольцов В.В.* Інститут  
електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, Київ, Україна

## **ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕХІДНИЙ ЕЛЕМЕНТ**

Способи зварювання тиском успішно використовуються для нероз'ємного з'єднання різних металів та сплавів, зокрема жароміцних сталей і сплавів у одно- та різнорідному сполученні. Існує значна кількість сполучень матеріалів, безпосереднє зварювання яких не забезпечує одержання якісних з'єднань або виникають проблеми утворення у зоні з'єднання крихких прошарків при післязварювальній термічній обробці виробів [1]. Зокрема, до таких відносяться сполучення сталей різних класів, сталей з жароміцними нікелевими сплавами (ЖНС) та різнойменних ЖНС (ливарних, деформованих, порошкових).

При способах зварювання тиском розроблені технологічні рішення, які ґрунтуються на використанні перехідного елемента (ПЕ) з інших металів і сплавів. При відповідному виборі матеріалу ПЕ формуються якісні з'єднання, що не втрачають свої властивості у процесі експлуатації зварного вузла. Так, при зварюванні тертям (ЗТ) однорідних і різнорідних сполучень матеріалів використовували ПЕ з інших металів і сплавів, який перед зварюванням розташовують у заглибленні циліндричної форми однієї із заготовок [2]. Однак, як зазначається у даній роботі, міцність зварних з'єднань для різнорідного поєднання матеріалів значно нижча за відповідні показники для основного матеріалу заготовок.

Існує ряд технічних рішень, які передбачають послідовне ЗТ однієї із заготовок із ПЕ, механічну обробку до заданих розмірів з наступним зварюванням заготовок [1, 3]. Зокрема, при ЗТ різнорідного з'єднання заготовок із мартенситної сталі 9Cr-1Vо-V-Nb і аустенітної сталі 18Cr-8Ni для запобігання утворення проміжного крихкого прошарку, використовували ПЕ з аустенітної сталі 309S або 310S [1]. Спочатку ПЕ приварювали по всій площі перерізу із заготовкою сталі 9Cr-1Vо-V-Nb, механічно обробляли до заданої товщини, а потім виконували ЗТ із сталлю 18Cr-8Ni. Товщина ПЕ у комбінованому зварному з'єднанні при такій технологічній схемі є практично рівномірною по перерізу заготовок і становить близько 10 мм.



Для описаних технічних рішень спільним є неможливість одержання комбінованих стикових зварних з'єднань з ПЕ, товщина якого змінюється по перерізу заготовок і становить менше 1 мм (для досягнення ефекту контактного зміцнення з'єднання з тонкими прошарками). В умовах експлуатації зварного виробу розподіл механічних напружень по перерізу заготовок, як правило, є нерівномірним (наприклад, у центральній частині заготовок механічні напруження при стисненні або розтягненні значно відрізняються у порівнянні з периферійною частиною перерізу).

Проводили експерименти по ЗТ заготовок діаметром 18 мм із сталі 20 через локальний ПЕ із сталі 12Х18Н10Т, розміщений у центральній частині перерізу заготовок. Попередньо до зварювання у центрі поперечного перерізу однієї із заготовок співвісно її осі виконували заглиблення у формі конуса глибиною  $h_0 = 0,1-1,0$  від величини припуску на осадку  $l_{oc}$  при ЗТ. Площу поперечного перерізу заглиблення  $S_{загл}$  задавали в діапазоні 0,05–0,50 від площі перерізу заготовок  $S_3$ . У виконанні механічною обробкою заглиблення урівень торцевої поверхні заготовки методом зварювання неплавким електродом у захисному інертному газі закріплювали перехідний елемент із сталі 12Х18Н10Т. Після цього виконували ЗТ з заданим припуском на осадку  $l_{oc}$ .

Дослідженнями встановлене явище, яке полягає у тому, що в процесі ЗТ пластифікований матеріал ПЕ із центральної частини перерізу заготовок при своєму переміщенні у напрямку периферійної частини відтісняє приконтатні об'єми металу сталі 20 у радіальному напрямку і одночасно – в осьовому напрямку углиб заготовок. При досягненні деякої величини осьової деформації заготовок, зона контакту заготовок формується тільки з матеріалу ПЕ, а саме із сталі 12Х18Н10Т. За результатами досліджень розроблено спосіб ЗТ [4].

Для нероз'ємного з'єднання сплавів, які значно відрізняються за своїми механічними та теплофізичними властивостями, розроблено технологію ЗТ через ПЕ, особливість якої полягає у суміщенні операцій виконання заглиблення і закріплення перехідного елемента. Ці дві операції виконують одночасно методом ЗТ першої заготовки і заготовки із матеріалу ПЕ, який має більший коефіцієнт теплопровідності у порівнянні з матеріалом першої заготовки. Після цього механічно обробляють ПЕ урівень поверхні першої заготовки і виконують ЗТ заготовок.

При металографічних дослідженнях з'єднань, отриманих за розробленою технологією ЗТ встановлено, що забезпечується повне

заповнення матеріалом ПЕ всього перерізу заготовок у вигляді суцільного прошарку. Товщина ПЕ становить до 0,5 мм, що забезпечує можливість реалізації ефекту контактного зміцнення при випробуваннях зварних з'єднань на розрив. При механічних випробуваннях зразків зварних з'єднань одержано результати суттєво вищі показників для основного металу заготовок, що зварюються, і матеріалу перехідного елемента.

### **Література**

1. Yamazaki, M. Creep rupture properties and fracture type of 9Cr-1Vо-V-Nb/18Cr-8Ni steel dissimilar joints / M. Yamazaki, T. Watanabe, Y. Yjngo, V. Tabuchi // Welding in the world. – 2011. – Vol. 55, 1; 2. – P. 67–75.
2. Sassani, F. Friction welding of incompatible materials / F. Sassani, J. R. Neelam // Welding Journal. – 1988. – 11. – S. 264–270.
3. Черненко, И. А. Сварка трением бронзы Бр012 и силумина со сталями через промежуточные прослойки из меди и алюминия / И. А. Черненко, А. Г. Захаров, И. А. Цуруль, Б. А. Форостовец // Автомат. сварка. – 1991. – 11. – С. 56–57.
4. Патент України на корисну модель №73836, опубл. 10.10.2012. Бюл. №19.

*Ільницька Г.Д., Логінова О.Б., Лавріненко В.І.,  
Смоквіна В.В., Зайцева І.М., Котинська Л.Й.,  
Тимошенко В.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

### **ОТРИМАННЯ ЕЛІТНИХ ШЛІФПОРОШКІВ З СИНТЕТИЧНИХ АЛМАЗІВ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

При алмазно-абразивній обробці поверхні оброблюваних деталей на ефективність роботи шліфувального інструменту впливають характеристики алмазних порошоків, які формуються в процесі синтезу алмазу, сортування та класифікації. Одним з найважливіших шляхів досягнення збільшення зносостійкості алмазного інструменту є підвищення однорідності алмазних порошоків за міцністю, які застосовують в алмазному інструменті.

Під час синтезу зростання кристалів алмазу супроводжується утворенням поверхні кристалів, загальна термодинамічна властивість якою є надмірність поверхневої енергії по відношенню до обсягу а також наявність поверхневого натягу, що впливає на кристалізацію алмазів і реконструкцію поверхні. При цьому створюються кристали алмаза з різною поверхнею від атомногладенької до розвиненої дефектної. Дефекти поверхні кристалів алмаза мають підвищену хімічну активність і впливають на характеристики міцності кристала.

В зв'язку з цим для підвищення працездатності абразивного інструменту актуальним є удосконалення способів розділення зернистого матеріалу за дефектністю поверхні і отримання порошків синтетичного алмазу з високою однорідністю за міцністю.

Для підвищення ефективності розділення зернистого матеріалу за дефектністю поверхні і міцністю зерен нанесення металевих частинок здійснювали в рідкому середовищі, що забезпечує більш високу вибірковість закріплення частинок поверхні тому, що адгезійна сила прилипання частинок у рідкому середовищі значно менша ніж у повітряному. Такий спосіб дозволяє вибірково закріпитися і утримуватися на розвиненій дефектній поверхні зерен надтвердих матеріалів меншій кількості частинок, які створюють набуті властивості, що дозволяє проводити більш ефективно сортування зернистих порошків у відповідних полях магнітних або електричних різної напруженості. Це відбувається тому, що на розвиненій дефектній поверхні зерен порошку надтвердих матеріалів закріплюється менша кількість частинок, що створює набуті властивості у зерен, і такі зерна розподіляються з більшою селективністю, що сприяє одержанню порошків, які розрізняються за дефектністю поверхні і за міцністю.

Дослідження проводили на шліфпорошках алмазу марки АС20 зернистості 125/100, синтезованих в системі Ni-Mn-C. Нанесення на дефектні ділянки поверхонь зерен тонкодисперсних феромагнітних частинок з розміром часток менше 1000 нм з концентрацією цих часток  $2,5 \pm 0,1\%$  проводили в водному середовищі при постійному перемішуванні протягом  $25 \pm 2$  хв.

Після проведення операції нанесення, воду із частинками порошку заліза, що не закріпилися, зливали, а порошок алмазу із частинками заліза, що закріпилися на поверхні зерен, висушували, а потім розділяли в магнітному полі на електромагнітному сепараторі 138 Т при напруженості від 5 до 20 А/м з отриманням чотирьох фракцій розділення порошків алмазу з різною дефектністю поверхні та міцністю.

Для кожної окремої фракції визначали вихід в %, дефектність поверхні, міцність, однорідність за міцністю. Міцність у вигляді показника міцності при статичному стисненні ( $P$ , Н) за методикою ДСТУ 3292. Дефектність поверхні оцінювали у вигляді коефіцієнта поверхневої активності ( $K_a$ , %), однорідність алмазів за міцністю ( $K_{\text{одн.міц}}$ ) та однорідність за лінійними розмірами ( $K_{\text{одн.л.р}}$ ) оцінювали за методиками розробленими в Інституті надтвердих матеріалів.

Результати адгезійно-магнітного сортування алмазів у водному середовищі приведені у табл. 1.

**Таблиця 1 – Результати адгезійно-магнітного сортування алмазів марки АС20 зернистості 125/100, з використанням нанесення тонкодисперсних феромагнітних часток в водному середовищі**

Фракція розподілу	Вихід, %	$K_a$ , %	$P$ , Н	$K_{\text{одн.міц}}$ , %	$K_{\text{одн.л.р}}$ , %	$K_{\text{ТС}}$ , %	Марка за ДСТУ 3292
1	12,9	0,55	37,7	73	61	72	АС50-Е
2	38,0	0,79	28,2	65	60	70	АС32-Е
3	37,6	1,04	17,9	62	54	59	АС20
4	11,5	1,27	12,1	47	37	47	АС15
Вихідний	100,0		23,7	30	28	57	АС20

За результатами розділення за дефектністю поверхні вихідних алмазів марки АС20 зернистості 125/100, синтезованих в системі Ni-Mn-C, в водному середовищі, у слабо лужному розчині, було отримано порошки, 1 і 4 фракцій розподілу які за коефіцієнтом поверхневої активності  $K_a$  відрізняються між собою приблизно у 2,3 разів, що забезпечує виділення із вихідних алмазів марок АС50 та АС32 у кількості 50,9% при чому 12,9% марки АС50. Шліфпорошки алмазів марок АС50 та АС32 отримані з високою термостабільністю та з високою однорідністю за міцністю та лінійними розмірами за ТУ У 23.9-05417377-383:2023, що дозволяє віднести їх до елітних марок.

На підставі виконаних досліджень було розроблено технологічну інструкцію "Виготовлення елітних синтетичних алмазних шліфпорошків спеціального призначення для шліфувального інструмента"

*Калініченко В.І.* Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренко НАН України, Київ,  
*Катеринич С.Є., Магопець С.О.* Центральноукраїнський  
національний технічний університет, Кропивницький  
*Шамрай В.Б.* Національний авіаційний  
університет, Київ, Україна

## **ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ДЕТАЛІ ВУЗЛІВ І АГРЕГАТІВ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Умови експлуатаційного навантаження деталей вузлів і агрегатів засобів транспорту різного призначення характеризуються наявністю агресивного середовища, абразивних частинок у газовому потоці, одночасною дією високих статичних та динамічних навантажень, зміною температури в широкому інтервалі. Наслідком цих складних експлуатаційних умов є розміщення та руйнування конструктивних елементів, що проявляється в найрізноманітніших формах: зношення, накопичення дефектів структури й розвиток тріщин малоциклової та багатоциклової втоми, міжкристалічна і пітингова корозія сталевих деталей та їх корозійно-втомлене пошкодження та інше. Інтенсивність протікання процесів розміщення в поверхневому шарі в кінцевому рахунку визначає надійність та ресурс деталей вузлів і агрегатів засобів транспорту.

Відомо, що загальний ефект при одночасному впливі експлуатаційних факторів може бути незрівнянно вищий від дії кожного фактору окремо. Це називають явищем синергізму або неадитивністю дії. Силова напруженість, теплонавантаженість та пошкодження конструктивних елементів деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту визначаються їх режимами експлуатації. Вплив на міцність конструктивних елементів деталей здійснюють температурні напруження, що виникнення при коливання температур. Ці напруження можуть привести до руйнування деталей через термічну втому. Також, при впливі підвищених температур необхідно враховувати, що основні характеристики матеріалів деталей помітно реагують на зміну температури. При тривалому впливі температури властивості матеріалів змінюються в сторону окрихчення (матеріал стає більш крихким), що робить його більш чутливим до концентраторів напружень. Крім того, внаслідок дії напружень та температур конструктивні елементи деталей змінюють свої геометричні

форми і розміри, що фіксуються в процесі експлуатації. Напруження та деформації, що виникають при навантаженні деталей, змінюються в часі, навіть якщо навантаження залишаються постійними.

Швидкому розвитку корозії деталей вузлів і агрегатів засобів транспорту сприяють умови експлуатації: різка зміна температур на протязі короткого часу. Це істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу: корозійні пошкодження приводять до зниження в 2-3 рази межі витривалості.

Серед основних видів корозійного пошкодження деталей транспортних засобів пітингова корозія найбільш небезпечна. Вона призводить до різкого зниження межі витривалості деталей. Пітинги, що утворюються в результаті корозійного пошкодження, є концентраторами напружень та можуть негативно впливати на довговічність деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту. Аналіз пошкоджень деталей вузлів та агрегатів транспортних засобів різного призначення дозволив їх класифікувати (табл. 1).

**Таблиця 1 – Класифікація пошкоджень деталей вузлів і агрегатів транспортних засобів**

Признак	Варіанти
Тип пошкодження	Корозійний, абразивний, статичний і динамічний.
Вид пошкодження	Повне руйнування, макротріщини, мікротріщини
Причини, що викликають пошкодження	<p><u>Конструктивні</u>: недоліки конструкції, що викликають підвищений рівень напружень та температур. Неправильний вибір матеріалів і вимог до них.</p> <p><u>Технологічні</u>: недоліки механічної обробки, контролю деталей згідно креслення, недоліки процесу нанесення покриттів.</p> <p><u>Виробничі</u>: відхилення від креслення деталі, відхилення за якістю матеріалу, неякісне виготовлення конструктивних елементів, що впливають на рівень динамічних та статичних напружень в деталях.</p> <p><u>Експлуатаційні</u>: порушення режимів експлуатації, які регламентовані технічними умовами</p>
Вплив на безпеку подальшої експлуатації	<p>Не впливає на ресурс</p> <p>Обмежує термін подальшої експлуатації</p> <p>Вимагає термінової заміни деталей</p>

Оцінка впливу експлуатаційних факторів на деталі вузлів і агрегатів засобів транспорту дає змогу зробити висновок:

- в транспортних засобах деталі вузлів і агрегатів працюють у різних умовах експлуатації: має місце одночасний вплив середовища, температури, статичних та динамічних навантажень з широким спектром коливань;
- в результаті неадитивної дії експлуатаційних факторів відбувається розміцнення та втрата властивостей матеріалів, із яких виготовлені деталі;
- одним з основних видів руйнування конструктивних елементів деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту є руйнування від зносу та втоми. Це зумовлено зниженням зносостійкості та межі витривалості, підвищенням амплітуди вібраційних напружень, що викликано їх корозійно-механічним пошкодженням предметів та впливом температури;
- комплексом факторів, який визначає надійність засобів транспорту різного призначення є раціональний вибір конструкції їх деталей та матеріалу, врахування зміни характеристик міцності, що базуються на особливостях та умовах роботи транспортних засобів в експлуатації;
- підвищення довговічності деталей вузлів і агрегатів засобів транспорту, що визначається їх зносостійкістю та межею витривалості, потребує ефективного, і, по можливості, недорогого захисту від неадитивної дії експлуатаційних факторів.

*Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан.,  
Копейкіна М.Ю., Мельничук Ю.О., Найденко А.Г.*  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, Київ, Україна

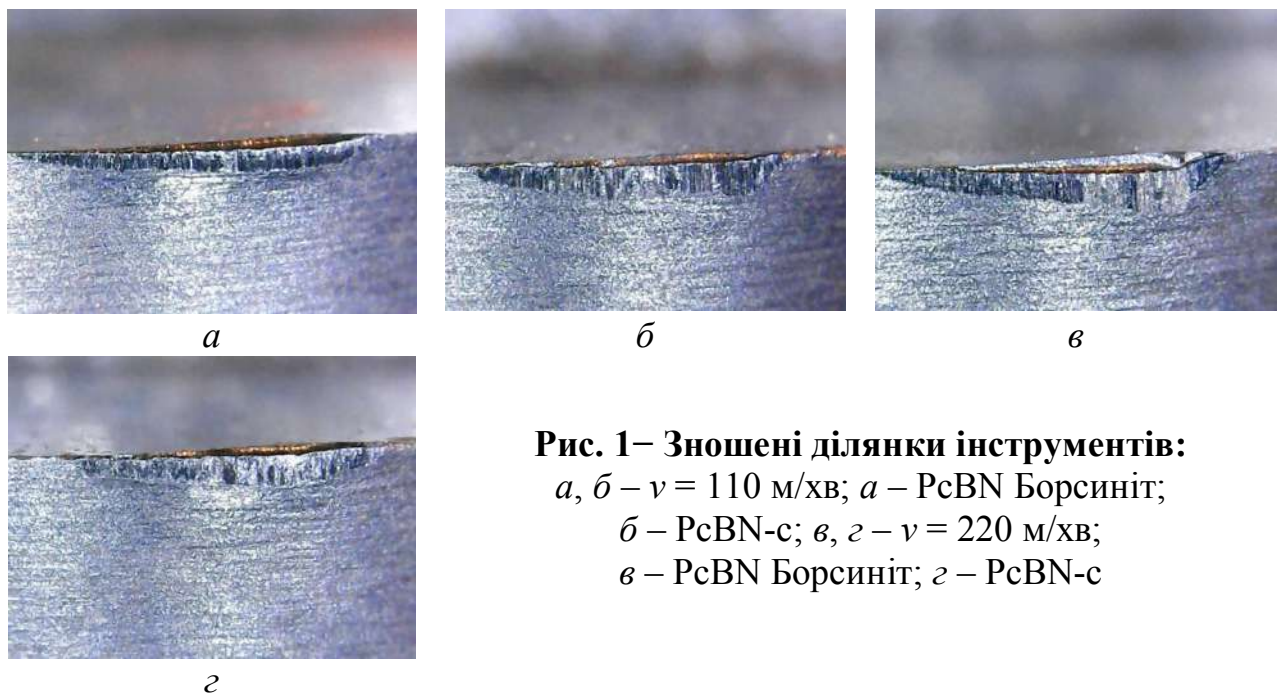
## **ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ, ОСНАЩЕНИХ РСВН ГРУП ВН, VL, ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ**

Експериментальні дослідження зношування інструментів, оснащених композитами групи ВН (отриманих з традиційних порошків cVN – PcVN Борсиніт та з порошків cVN з покриттям

TiN+TiB<sub>2</sub> (Ti 3–8% від маси cBN) – PcBN-с) та композитами групи BL (керамо-матрична складова – TiN 40% та TiC 35%+Al 5%), проводилися при обробці сталі ХВГ твердістю 58–60 HRC.

Структура PcBN-с характеризується малим вмістом керамічної фази (композит відноситься до групи ВН), яка рівномірно розподілена по межах зерен, що відповідає одному з основних вимог, які висуваються до композитів групи BL.

Результати експериментів демонструють, що морфологія зношених ділянок інструментів з композитів групи ВН, на відміну від кількісних параметрів зношених ділянок, однотипна (рис. 1) і характеризується наявністю фаски зносу на задній та лунки на передній поверхнях. Кількісна характеристика процесу зношування інструментів приведена на діаграмах (рис. 2).

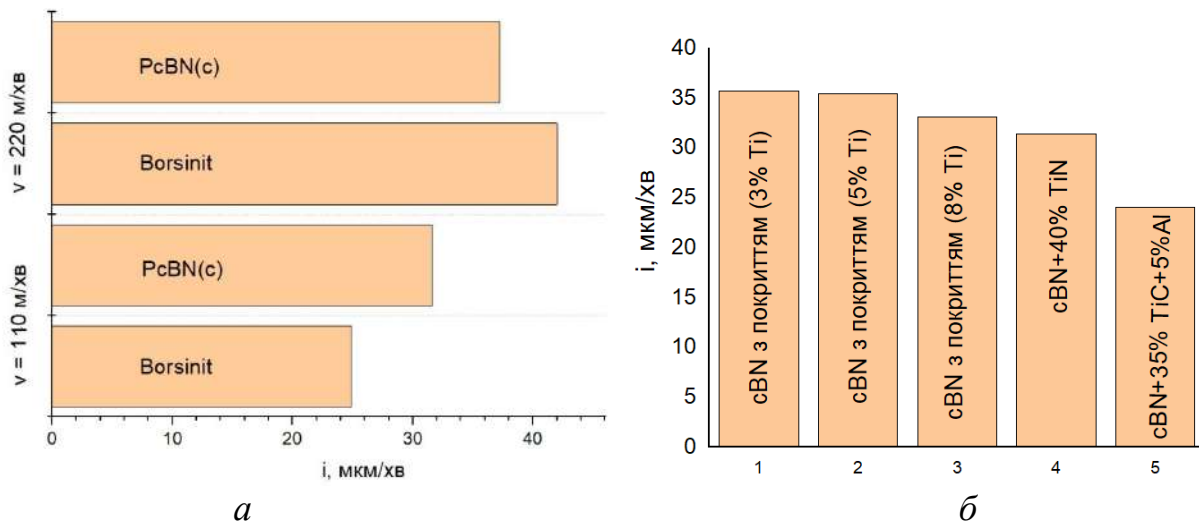


**Рис. 1 – Зношені ділянки інструментів:**  
*a, б* –  $v = 110$  м/хв; *a* – PcBN Борсиніт;  
*б* – PcBN-с; *в, з* –  $v = 220$  м/хв;  
*в* – PcBN Борсиніт; *з* – PcBN-с

В діапазоні низьких швидкостей різання (110 м/хв) інструмент з PcBN Борсиніт характеризується меншою швидкістю зношування (25 мкм/хв.) у порівнянні з інструментом із композиту, виготовленого з порошку із покриттям (PcBN-с) (32 мкм/хв), що пов'язано з його більшою твердістю. Зі збільшенням швидкості до 220 м/хв інтенсивність зношування інструментів з обома композитами зростає, але в даному випадку меншою величиною швидкості зношування характеризується інструмент, оснащений PcBN-с – 42 та 37 мкм/хв. відповідно. Таким чином, ефективність застосування інструменту із PcBN, виготовленого із використанням порошків з покриттям, зро-



стає при збільшенні швидкості різання. Звичайно, це характерно для інструментів, оснащених PcBN групи VL – зі значним (30–40%) вмістом керамічних добавок. В досліджуваному випадку цей ефект спостерігається при значно меншому вмісті складової TiN, яка утворюється при використанні Ti в кількості 5% від маси порошку cBN в процесі CVD нанесення покриття, що свідчить про високі механічні властивості надтвердих композитів, виготовлених за даним методом.

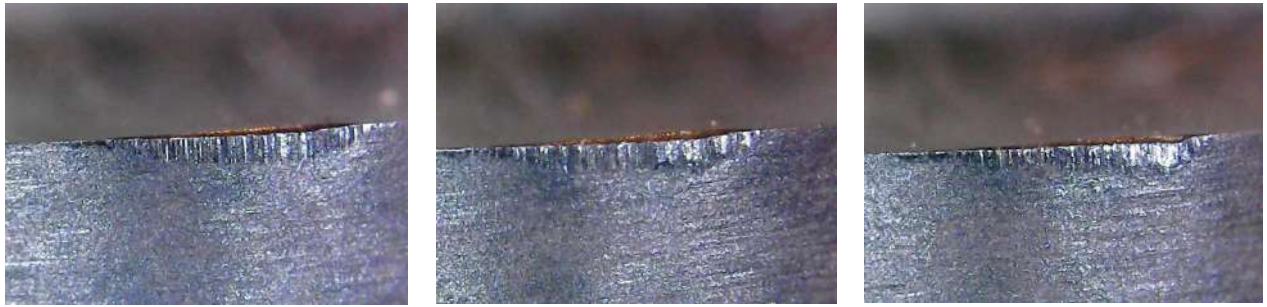


**Рис. 2 – Швидкість зношування інструментів, оснащених PcBN групи ВН (а), оснащених PcBN-с та PcBN групи VL, при швидкості різання  $v = 220$  м/хв (б)**

Таким чином, інструмент, оснащений PcBN-с, є ефективним при обробці з високими швидкостями різання.

У другій серії випробувань тести відбувались при швидкості різання 220 м/хв (рис. 3). Використовувались композити, виготовлені з порошків cBN з покриттям, та інструменти, оснащені PcBN групи VL. Отримані результати свідчать, що інтенсивність зношування інструментів із композитів обох типів, які містять TiN, практично не відрізняються і знаходяться в діапазоні 31–35 мкм/хв. Це свідчить про принципову можливість досягти суттєвого зниження (у порівнянні з інструментом із PcBN Борсиніт) зношування інструменту при суттєво меншому вмісті керамічної зв'язки у композиті.

На рис. 4. наведено зношені ділянки інструментів груп ВН, VL після обробки загартованої сталі при швидкості різання  $v = 220$  м/хв з ударним навантаженням.



*a*

*б*

*в*

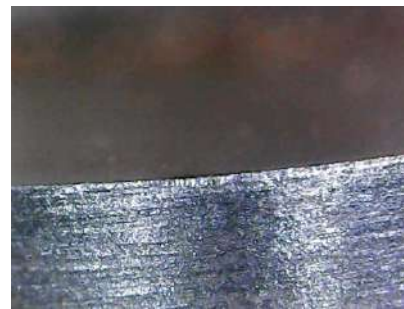


*г*

**Рис. 3 – Зношені ділянки інструменту:**

*a* – PсBN-с 3% Ti; *б* – PсBN-с 5% Ti;

*в* – PсBN-с 8% Ti; *г* – сBN+40% TiN



*a*



*б*



*в*



*г*



*д*



*е*



*ж*

**Рис. 4 – Зношені ділянки інструментів після обробки з ударом:**

*a* – PсBN-с – 3%Ti; *б* – PсBN-с – 5%Ti;

*в* – PсBN-с – 8%Ti; *г* – PсBN-с 5%Ti+Al;

*д* – сBN+40%TiN; *е* – сBN+35%TiC+5%Al;

*ж* – PсBN Борсиніт

Інструменти, оснащені композитами групи VL, практично непрацездатні в таких умовах – спостерігається викрашування вели-

ких фрагментів полікристалу, має місце крихке руйнування на контактній ділянці інструменту вже на початковому етапі обробки (в перші 20 с різання). В той же час, інструмент, оснащений РсВН Борсиніт, характеризується інтенсивним зношуванням контактних поверхонь, що характерно для інструменту із композитом групи ВН в умовах високошвидкісної обробки.

Інструмент, оснащений РсВН-с, дозволяє обробляти загартовані сталі при високих швидкостях різання (що характерно для композитів групи ВL) з ударним навантаженням (що характерно для композитів групи ВН).

*Коваленко І.А.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ЛЕЗОВА ОБРОБКА ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ**

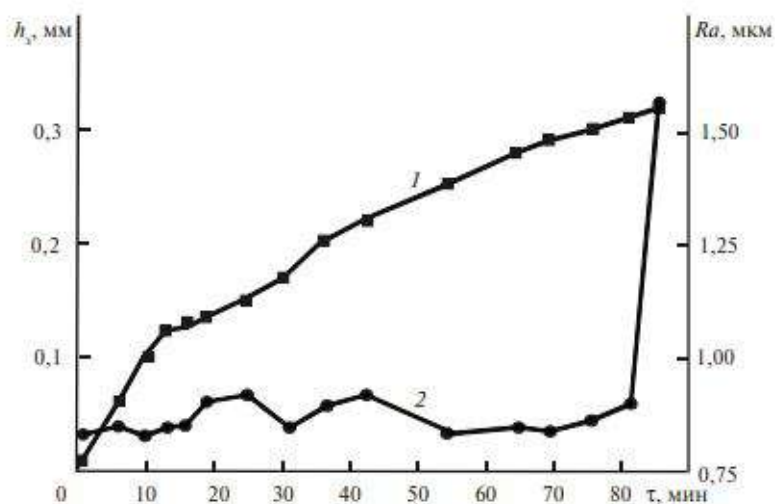
В даний час актуальним є використання залізовуглецевих сплавів з особливими властивостями, таких як високоміцні чавуни та загартовані сталі. Ці матеріали знайшли широке застосування у різних промислових галузях, включаючи машинобудування. Вони використовуються для виготовлення різних деталей, таких як блоки циліндрів, колінчасті вали, підшипники, труби, прокатні валки та інші. Однак, лезова обробка виробів з цих матеріалів є технологічним викликом через їх особливі властивості. Механічна обробка високоміцних чавунів та сталей потребує спеціалізованого обладнання та інструментів. Швидке зношування різального інструменту є однією з проблем, з якими стикаються виробники при роботі з цими матеріалами. У зв'язку з цим роботи багатьох дослідників спрямовані на вивчення структурних особливостей та механічних властивостей залізовуглецевих сплавів (твердість, міцність та інш.) та експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь виробів (зносостійкість, втомна міцність та інш.). Дослідження присвячені вивченню закономірностей процесу різання, впливу різних факторів контактної взаємодії в зоні різання на ефективність обробки. Метою таких досліджень є визначення умов обробки, які забезпечать максимальну продуктивність та мінімальне

зношування інструменту при забезпеченні якості оброблених поверхонь виробів.

Вирішення питань лезової обробки високоміцних чавунів і загартованих сталей обумовлює можливості розвитку сучасного виробництва та забезпечує довговічність та надійність техніки за рахунок застосування новітніх конструкційних матеріалів.

Найбільш ефективними інструментами для обробці високоміцних чавунів і загартованих сталей є інструменти, оснащені композистами на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) [1].

В [2] розглянуто деякі перспективні підходи до використання таких інструментів: – обробка косокутними однокромковими різцями, оснащеними квадратними змінними різальними пластинами, що непереточуються; – обробка інструментами з циліндричною (або конічною) передньою поверхнею, круглими змінними різальними пластинами, що непереточуються. Ці інструменти забезпечують високоякісну обробку виробів з чавуну та сталі та характеризуються подовженням строком роботи. Приклад зв'язку між часом роботи, зносом однокромкового косокутного інструменту та шорсткістю обробленої поверхні виробу із загартованої сталі наведено на рис. 1 [3].



**Рис. 1 – Вплив часу роботи на знос інструменту та шорсткість обробленої поверхні зразка зі сталі ШХ15 (60–62 HRC)  
( $S = 0,67$  мм/об;  $v = 1,32$  м/хв;  $t = 0,075$  мм;  $\lambda = 50^\circ$ )**

В роботі [4] підтверджена висока ефективність обробки прокатних валків з високолегованого чавуну інструментом з ПКНБ – забезпечується висока продуктивність виготовлення валків при значній стійкості різального інструменту: – при використанні різців з

пластинами з ПКНБ має місто незначне збільшення інтенсивності їх зношування з підвищенням швидкості різання; – різальний інструмент з ПКНБ демонструє значно більшу працездатність ніж шліфувальні круги з електрокорунду як при фінішній обробці, так і на операції обдирання.

Наведені в технічній літературі результати досліджень свідчать про високу ефективність інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ), для обробці виробів з важкооброблюваних чавунів і загартованих сталей. При цьому, важливим є не тільки використання оптимальних режимів різання, але і спеціальних конструкцій різальних інструментів, спроектованих за результатами вивчення особливостей процесів різання різних конструкційних матеріалів.

### **Література**

1. Klymenko, S. Improvement of technologies for edge cutting machining with tools equipped with superhard structured composites / S. Klymenko, M. Kopeikina // Modern manufacturing process and systems: collective monograph. – Belgrade-Vrnjačka Banja : SaTCIP Publisher Ltd., 2020. – Vol. 1 : Fundamentals. – P. 139–160

2. Клименко, С.А. 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. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля; 2018. – 304 с.

3. Клименко, С.А. Шероховатость поверхности деталей из закаленной стали после финишного точения с большими подачами / С.А. Клименко, А.С. Манохин, М.Ю. Копейкина, Ю.А. Мельничук // Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 12-й международ. науч.-техн. конф., 4–8 июня 2012 г., г. Ялта. – К. : АТМ Украины, 2012. – С. 129–132.

4. Шумакова, Т.О. Вибір різального інструменту для обробки ливарної корки високолегованого вибіленого чавуну / Т.О. Шумакова, А.П. Ніколаєнко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2022. – № 3 (273).

## ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВ $Ti$ , $Al$ та $N$ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

В машинобудівній галузі все частіше спостерігається зростання застосування інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору, в тому числі із захисними покриттями. Тому створення нових високоефективних різальних інструментів з різними захисними покриттями є актуальним науково-технічним напрямком досліджень.

Покриття інструментів на основі  $Ti-Al-N$  є подальшим кроком у напрямку підвищення твердості, втомної міцності та високотемпературної стійкості до окислення, і вважаються перспективною альтернативою покриттів  $TiN$  для різальних інструментів і механізмів, що піддаються високим навантаженням.

Велике значення для властивостей покриттів має методика їх отримання, що надає науковцям підґрунтя для пошуку нових й вдосконалення існуючих методик нанесення покриттів. Магнетронна конденсація (розпилення) в атмосфері суміші інертного та реактивного газів ( $Ar+N_2$ ) є однією із провідних і найбільш поширених методик для нанесення зносостійких покриттів.

Для того, щоб нанесення покриття на ріжучий елемент інструмента збільшувало його експлуатаційні властивості, воно повинно відповідати цілому ряду вимог: висока твердість ( $H = 35-50$  Гпа); низький коефіцієнт тертя ( $\mu = 0,10-0,35$ ); висока термостійкість ( $T_{ст} = 900-1200$  °С); висока в'язкість; низька теплопровідність ( $\lambda = 0,35-0,50$  Вт·м/К; висока стійкість до окислення ( $T_{ок}=800-1000$ °С; висока адгезійна міцність ( $L_c = 50-150$  Н); хімічна стабільність до робочого матеріалу.

Покриття, як правило, має більш низький коефіцієнт тертя у порівнянні з інструментальним матеріалом. В результаті знижується тертя між стружкою та передньою поверхнею, що значно зменшує абразивне зношування, ослаблює ефект адгезійного зношування із-за зменшення наростуутворення в процесі різання, також практично повністю запобігає дифузійному зношуванню.

У поперечному перерізі повний шар покриття повинен мати високу твердість, але водночас і досить високу в'язкість, що призводить

до зниження внутрішніх напружень і оберігає від викришування. Це забезпечується такими властивостями матеріалу покриття:

- 1) високою міцністю, зокрема втомною;
- 2) високим опором ударним навантаженням;
- 3) високим опором тріщиноутворенню;
- 4) високим опором впливу високих температур і термічним ударам;
- 5) низькою теплопровідністю.

### **Література**

1. Tryggvason, T. K. The properties of TiN ultra-thin films grown on SiO<sub>2</sub> substrate by reactive high power impulse magnetron sputtering under various growth angles / T. K. Tryggvason, L. Karlsson, S. Shayestehaminzadeh, S. Olafsson, J. T. Gudmundsson // Thin Solid Films. – 2013. – Vol. 548. – P. 354–357.

*Ковальов В.Д., Клименко Г.П., Васильченко Я.В.,  
Шаповалов М.В., Бородай Р.А., Корчма Д.О.  
Донбаська державна машинобудівна академія,  
Краматорськ, Україна*

## **КОНЦЕПЦІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРОННОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЯК МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ**

Важкі верстати залишаються ключовими компонентами у виробничому процесі деталей енергетичного та військового призначення. Технологічна трансформація інформаційного суспільства призводить до значних змін у вимогах до важких верстатів. Нові технології та інновації, такі як штучний інтелект, інтернет та хмарні технології, вимагають більшої точності та продуктивності виробничих процесів. Розробники важких верстатів опиняються перед важким вибором між досягненням високої точності та збереженням продуктивності. Науково-технічний виклик полягає не лише в удосконаленні механічних конструкцій деталей енергетичного та військового призначення для досягнення більшої точності, але й у розробці технологій, які дозволять виготовляти їх масово з прийнятними виробничими витратами.

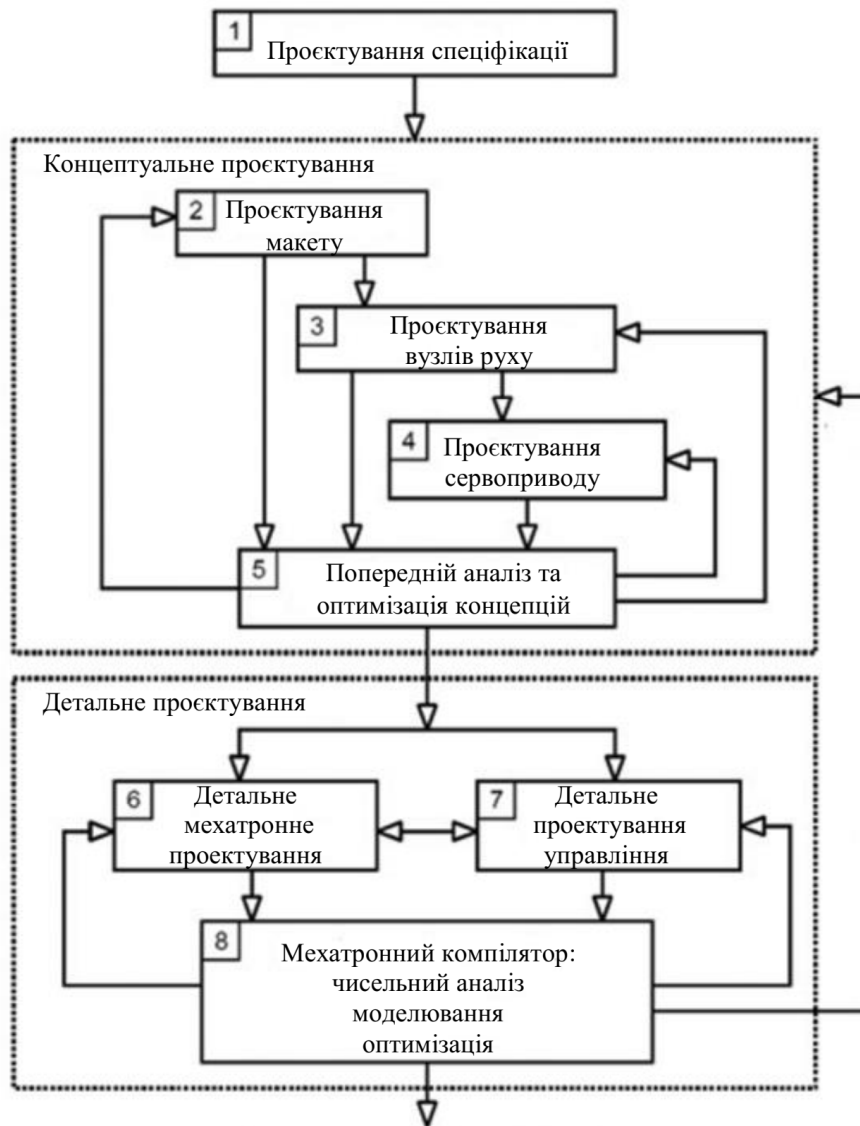
Однією з фундаментальних ініціатив, спрямованих на пошук рішення у сфері розвитку технологічних процесів виробництва великогабаритних деталей енергетичного та військового призначення, є скорочення технологічних процесів шляхом технологічного заміщення. Це має бути досягнуто шляхом підвищення точності, оскільки збільшення продуктивності здебільшого обмежується фізичними принципами, що лежать в основі цих виробничих процесів. Отже, протиріччя між вимогами до продуктивної точності у великих робочих зонах і гнучким, надійним виробництвом вимагає універсальної системної архітектури для верстатів з типовими властивостями мехатронних систем - здатністю до переналагодження (реконфігурації) і самооптимізації (стійкості до збурень).

В останні десятиліття мехатроніка утвердилася як метод розробки таких систем і сьогодні є ключовою дисципліною в технології виробництва. Концепція системи проектування на основі моделей представлена на рис. 1. Це інтегрована програмна система для синтезу, аналізу та оптимізації конструкцій важких верстатів, в якій, крім структурних елементів, приводи та елементи керування зберігаються як параметризовані елементи, і проектувальник синтезує свою конструкцію з них. Взаємодія між елементами встановлюється на діаграмі послідовності, з якої можна отримати програмне забезпечення програмованого логічного контролера (ПЛК).

Тенденції розвитку важких верстатів полягають у зростаючому використанні самооптимізуючих, частково адаптивних компонентів і використанні все більш ефективних систем керування для компенсації помилок верстатів, а також керуванні на основі моделей управління технологічними процесами. Переналагоджуваність як необхідна передумова для гнучкості важких верстатів вимагає створення та стандартизації інтерфейсів, які були б уніфіковані з точки зору їх механічних, енергетичних та інформаційно-технологічних аспектів.

Ці компоненти верстатів повинні бути строго функціонально орієнтованими за своєю конструкцією. Аналогії з розвитком комп'ютерних технологій або робототехніки стають більш помітними. Ця тенденція супроводжується фундаментальними перетвореннями в кінематичних структурах та в архітектурі систем управління. Одним з головних викликів є гарантування надійності цих мехатронних систем для задовільнення економічних вимог. Завдання полягає в тому, щоб повною мірою використовувати мехатронні опції та можливості мехатроніки вже на ранній стадії проектування.





Оптимальна конструкція верстату

**Рис. 1 – Система проектування важких верстатів як мехатронних систем**

Крім оцінки стандарту якості, необхідно керувати створенням конфігурацій апаратного та програмного забезпечення. Програмне забезпечення для управління всією системою може створюватися автоматично, так само як і програмне забезпечення відповідних виконавчих механізмів. Інструменти оптимізації дозволять досягти оптимального розподілу функцій між компонентами, в тому числі з точки зору енергетичних критеріїв. Водночас проводиться створення моделі надійності, яка враховуватиме всі наявні в системі датчики, які забезпечать перебування всіх елементів системи в робочому стані. Як результат, при проектуванні верстатів для обробки деталей енергетичного та оборонного призначення відбувається трансформація парадигми "надійність всупереч мехатроніці" в парадигму "надійність завдяки мехатроніці".

## **ІНТЕГРАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ ТА РОЗРОБКА НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ В ГАЛУЗІ БІОРОЗКЛАДНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ**

У світі, де питання екології стає дедалі актуальнішим, важливість розробки біорозкладаних полімерних матеріалів та їх стандартизації набуває особливого значення. Ця тема відкриває шлях до зниження забруднення навколишнього середовища пластиком, пропонуючи альтернативні рішення, які можуть ефективно інтегруватися в природні цикли без шкоди для екосистем. Метрологічні аспекти, пов'язані з цією галуззю, відіграють ключову роль у забезпеченні надійності, точності та відтворюваності даних, що є фундаментальними для наукових досліджень та виробничих процесів.

Розробка та стандартизація біорозкладаних полімерних матеріалів важливим напрямком у сфері сучасних матеріалознавства та екології, оскільки вони забезпечують альтернативу традиційним пластикам, які накопичуються у навколишньому середовищі та призводять до забруднення. Біорозкладані полімери, засновані на природних або синтетичних компонентах, здатні розкладатися під дією мікроорганізмів на воду, вуглекислий газ, метан, біомасу та інші нешкідливі речовини, що значно зменшує їхній екологічний вплив.

Метрологічні аспекти розробки та стандартизації біорозкладаних полімерних матеріалів охоплюють вимірювання властивостей матеріалів, визначення їхньої біорозкладності, а також розробку стандартів, які регулюють ці процеси. Важливість метрології полягає у забезпеченні точності, відтворюваності та порівнянності результатів вимірювань, що критично необхідно для наукових досліджень, контролю якості та сертифікації продукції.

Для оцінки біорозкладності полімерів використовуються різні методи, які можуть включати лабораторні тести у контрольованих умовах, використання спеціальних біореакторів, а також випробування в природних умовах. Ці методи дозволяють виміряти швидкість розкладу матеріалів, вивільнення вуглекислого газу або метану, а також зміну маси полімеру протягом часу. Результати таких вимірювань допомагають визначити, чи відповідає матеріал вста-

новленим критеріям біорозкладності та може бути класифікований як біорозкладаний.

Стандартизація біорозкладаних полімерів включає розробку нормативних документів, які встановлюють вимоги до складу, властивостей, методів випробувань та критеріїв біорозкладності. Ці стандарти необхідні для гармонізації підходів на міжнародному рівні, сприяння торгівлі та захисту довкілля. Важливою роботою міжнародних та національних організацій по стандартизації, таких як ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) та ASTM (Американське товариство по випробуванням матеріалів), які розробляють і публікують стандарти для біорозкладаних матеріалів.

Успіх у розробці та стандартизації біорозкладаних полімерних матеріалів залежить від глибокого розуміння метрологічних аспектів, здатності точно вимірювати ключові параметри та розробки ефективних стандартів, які сприятимуть інноваціям та захисту навколишнього середовища.

Додатково, при розробці та стандартизації біорозкладаних полімерних матеріалів особливу увагу приділяють також екологічному циклу продукції, починаючи з виробництва полімерів і закінчуючи їхнім кінцевим розкладанням у навколишньому середовищі.

Важливим не лише забезпечення біорозкладності матеріалів, але й мінімізація використання ресурсів та енергії під час їх виробництва, а також зменшення викидів шкідливих речовин. Такий підхід сприяє реалізації принципів сталого розвитку та економіки замкнутого циклу.

Окрім того, увага дослідників спрямовується на пошук нових видів сировини для виробництва біорозкладаних полімерів, зокрема, на основі відновлюваних рослинних ресурсів, таких як крохмаль, целюлоза, лігнін, та інших біомас. Це дозволяє не лише знизити залежність від викопного палива, але й зменшити вуглецевий слід продукції.

В Україні розвиток та стандартизація біорозкладаних полімерних матеріалів набуває все більшого значення в контексті екологічної політики та прагнення до зменшення забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами. Українські науково-дослідні інститути та університети активно працюють над розробкою нових видів біорозкладаних полімерів, заснованих на природних ресурсах, таких як крохмаль, целюлоза та інші біополімери. Один з яскравих прикладів українських наукових досягнень у цій галузі – робота вчених з Інституту біохімії ім. О.В. Палладіна Національної академії наук Укра-

їни. Вони займаються дослідженням та розробкою біорозкладаних полімерів на основі натуральних компонентів, таких як крохмаль, целюлоза та інші біополімери, що відновлюються. Це дозволяє створювати матеріали, які можуть ефективно розкладатися у навколишньому середовищі без шкоди для екосистем.

Стандартизація біорозкладаних полімерів в Україні включає розробку технічних норм та стандартів, які визначають критерії біорозкладності, компостування, токсичності та інші важливі параметри. Хоча на даний момент в Україні не існує специфічного закону, який би безпосередньо регулював стандартизацію біорозкладаних полімерів, така робота здійснюється в рамках загальних екологічних та стандартизаційних ініціатив. Урядові агенції та організації зі стандартизації працюють над адаптацією міжнародних стандартів, таких як ISO 17088 для компостованих пластиків, до українських умов.

Наприклад, у країнах ЄС, зокрема у Швейцарії, підхід до розроблення та стандартизації біорозкладних полімерів є дуже систематизованим і зорієнтованим на високі стандарти екологічної безпеки та сталого розвитку. Швейцарські компанії та наукові установи лідирують у дослідженні та розробці інноваційних біотолімерів, використовуючи передові технології для створення матеріалів з відмінними характеристиками розкладання та екологічної безпеки. Швейцарія активно впроваджує європейські норми та стандарти, а також розробляє власні національні стандарти, що відповідають її екологічним цілям.

На міжнародному рівні Швейцарія підтримує стандарти ISO у сфері біорозкладаних матеріалів, зокрема ISO 17088, який визначає вимоги до компостування та біорозкладання пластиків. Також Швейцарія працює над розробкою власних технічних регламентів, які встановлюють ще більш строгі вимоги до безпеки та ефективності біорозкладних полімерів.

На відміну від України, де законодавча база ще формується, Швейцарія має добре розвинену систему екологічного регулювання, яка включає конкретні закони та норми, спрямовані на контроль та стандартизацію біорозкладаних полімерів. Це сприяє не тільки захисту навколишнього середовища, але й розвитку інновацій в галузі екологічних матеріалів.

Міжнародні стандарти ISO для біорозкладаних полімерів:

- ISO 17088: "Специфікації для компостованих пластиків". Цей стандарт встановлює вимоги до пластикових матеріалів, які підлягають компостуванню в промислових умовах. Він включає критерії,

такі як біорозкладність, вміст тяжких металів та вплив на процес компостування.

• ISO 18606: "Упаковка та середовище – Органічне перероблення". Цей стандарт описує вимоги до упаковки, призначеної для органічного перероблення через компостування або анаеробне перетворення.

**Висновки.** Розвиток та стандартизація біорозкладаних полімерних матеріалів відіграють ключову роль у формуванні більш сталого та екологічно відповідального підходу до виробництва та споживання, стаючи важливою частиною зусиль зі зменшення пластикового забруднення.

Метрологічні аспекти забезпечують наукову та практичну базу для точного вимірювання властивостей таких матеріалів і визначення їхньої біорозкладності, що критично важливим для розробки ефективних стандартів. Ці стандарти, у свою чергу, сприяють гармонізації міжнародних норм, підтримці інновацій і забезпеченню високої якості продукції, водночас мінімізуючи вплив на довкілля та забезпечуючи ефективну рециклізацію або біорозкладання.

Як в Україні, так і в Швейцарії, інтеграція міжнародних та розробка національних стандартів і законодавства в цій галузі демонструє зобов'язання до екологічної безпеки та сталого розвитку, вказуючи на глобальну тенденцію до зниження впливу пластикових відходів. Подальші дослідження, інновації та розробка нових матеріалів, а також оптимізація виробничих процесів з мінімальним впливом на навколишнє середовище, ключовими для досягнення цієї мети. Такий комплексний підхід не лише сприятиме забезпеченню екологічної безпеки, але й забезпечить сталий розвиток на міжнародному та національному рівнях, підкреслюючи важливість продовження зусиль в цьому напрямку.

### **Література**

1. ISO 17088:2012. Специфікації для компостованих пластиків Міжнародна організація зі стандартизації.

2. Андрієнко, Т.О. Біорозкладні полімери: властивості, отримання, застосування / Т.О. Андрієнко, Л.М. Литвиненко, Н.В. Петренко. – Київ : Наук. думка, 2020. – 156 с.

3. Петровський, Б.Є. Інноваційні технології у виробництві біорозкладних полімерних матеріалів / Б.Є. Петровський. – Наукові праці. – 2021. – № 45. – С. 112–119.

*Комарова Г.Л. Український державний  
університет залізничного транспорту,  
Лалазарова Н.О. Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ ЗАЛІЗА З НАКЛАДАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ**

В даний час у закордонній та вітчизняній практиці розроблено ряд методів підвищення фізико-механічних властивостей матеріалів.

Особливу увагу на Україні і за кордоном приділяється тим методам і способам, які забезпечують не тільки задані властивості, але і гарантують екологічну чистоту технологічного процесу.

Серед сучасних методів термохімічного впливу на залізовуглецевих сплави, найбільш екологічно чистим, фінішним процесом, є паро оксидування, так як в якості насичуючого середовища використовується перегрітий водяний пар. Незважаючи на це, паро оксидування не знайшло належного застосування в промисловості через обмеження температурних параметрів.

Щоб отримати оксидну плівку необхідними властивостями в атмосфері перегрітої пари при температурі нижчій, ніж 600 °С, протягом 1 год, процес паро оксидування необхідно інтенсифікувати.

Під дією електричного поля відбувається інтенсифікація іонізації атомів насичуючого середовища і збільшується ймовірність утворення вакансій, в кристалічній решітці оксидного шару.

Процес окислення металу в повітрі можна представити таким чином. З одного боку на наявний шар оксиду на поверхню заліза надходять нейтральні атоми і негативні іони кисню, а з іншого-позитивні іони заліза. Усередині оксиду іони заліза і кисню переміщуються згідно закону Фіке і Кулона, формуючи нові шари оксиду.

Впливом на формування шару оксиду інших атомів і молекул, наявних у повітрі можна, знехтувати.

Формування шару оксиду, обумовлене фізико-хімічними процесами, які відбуваються в насичуючому середовищі і оксиді, а так само на кордонах оксид-повітря і оксид-залізо.

У газовому середовищі за рахунок поверхневої і термічної іонізації, крім молекул, можливо присутність атомів, а також позитивних і негативних іонів кисню. Під впливом електричного поля іони кисню набувають додаткову енергію. У діапазоні значень температури і напруженості електричного поля, що використовуються в цій роботі.

$$E \leq 10^6 \text{ В/м}; 300 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 600 \text{ }^\circ\text{C}; \Delta W \leq 10^{-1} \text{ эВ}$$

Впливом електричного поля на атоми і молекули, що знаходяться в повітрі, можна знехтувати.

На межі розділу оксид-повітря існує потенційний бар'єр для молекул, атомів та іонів кисню, форма і висота якого визначається характером сили хімічного зв'язку атома або іона з поверхнею і силами зштовхування електронних оболонок атомів кисню і кристалічної решітки оксиду. За нульові значення енергії  $Q(r)$  прийнята енергія системи на великих відстанях між атомами і поверхнею оксиду.

Подолати цей бар'єр і вступити в хімічну реакцію з атомами заліза можуть тільки ті частинки, які мають енергію більшу, ніж висота цього бар'єру ( $Q_1$  – енергія активації). Якщо атом переміщається в напрямку оксиду і має енергію більше, ніж енергія потенційного бар'єру  $Q_1$ , то в цьому випадку атом може зайняти стійке положення на відстані  $r_1$  від поверхні оксиду (хемосорбція). Якщо атом має енергію менше ніж  $Q_1$ , то можливо стійке положення на відстані  $r_2$  від поверхні оксиду (фізична адсорбція).

Концентрація іонів кисню в газовому середовищі:

$$n_1 - n_2 = \alpha N_{\text{и}}; N_2 - N_1 = \gamma N_{\text{и}}$$

де  $\alpha$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти пропорційності, що визначаються дослідним шляхом.

У середині оксидного шару існують взаємно протилежні потоки іонів заліза і кисню, що визначаються першим законом Фіка і законом Ома. Після проведених теоретичних досліджень, робимо висновки, що електричне поле в першому наближенні інтенсифікує процес окислення металу в лінійній залежності від напруги електричного поля.

## Література

1. Комарова, Г. Вплив феримагнітного резонансу на перетворення мікрохвильової енергії системою, що складається з двох циліндрів в механічну // Радіотехніка. – 2023. – 1(212). – С. 102–114.

2. Martynenko, L.G. Resonance Method of Electromagnetic to Mechanical Energy Transformation / L.G. Martynenko, A.L. Komarova // Electric Electron Tech Open Acc J 1(2). – 2017. – 00008. – Режим доступу: 10.15406/eetoaj.2017.01.00008

3. Патент на винахід № 96055, «Спосіб нанесення поверхневого шару на вироби з металів та пристрій для його здійснення» / Л.Г. Мартиненко, Г.Л. Комарова Україна. – 2011, С23С 8/06.

## **ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ І АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Електрифікація, як крок до створення екосистеми сталого розвитку, вимагає комплексного та спільного підходу для досягнення максимального впливу на збереження природи, зниження викидів та створення більш ефективних та чистих технологічних рішень. Заміна традиційних автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння електричними автомобілями чи гібридними транспортними засобами, які використовують електродвигуни та батареї, пов'язані з електрифікацією транспорту. Електрифікація, в контексті сталого розвитку, представляє собою глибокий та трансформаційний процес, спрямований на зменшення впливу людської діяльності на довкілля та сприяння екологічній стійкості. Цей процес включає в себе не лише перехід до електричної енергії в транспорті, але й широкий спектр заходів у сфері сучасного машинобудування та енергетики.

Розробка ефективних систем заряджання та розвиток інфраструктури веде до забезпечення зручності власників електричних транспортних засобів, а перехід до використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія та вітряна енергія для виробництва електроенергії веде до економічних впливів споживачів. Заміна традиційних транспортних засобів, що використовують паливо, електричними аналогами або гібридними системами дозволяє значно знизити викиди CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин. Інтеграція електростанцій на базі відновлюваних джерел у енергетичну систему спонукає виробників до забезпечення стабільного та сталого розвитку електроспоживання. «Європа активно рухається в бік створення кліматично нейтрального контенту і працює над політикою скорочення викидів CO<sub>2</sub> від транспортного сектору. Його основна ідея – до 2050 р. у зменшити викиди від транспорту на 90%» [1].

Забезпечення взаємодії між різними секторами економіки (транспорт, енергетика, виробництво, машинобудування) для створення взаємозалежної та екологічно сталої екосистеми при заміні традиційних приводів та системи виробництва на більш енергоефективні та електрично збалансовані рішення, використання автоматизації та



роботизації виробничих процесів – всі ці заходи направлені для підвищення ефективності економіки країни та зниження енерговитрат. Моделювання та тестування у віртуальних середовищах дозволяє зменшити час та витрати на створення нових технічних рішень.

Використання електричних технологій та обладнання для приводу виробничих процесів може зменшити витрати енергії та викиди. Інтеграція штучного інтелекту в машинобудуванні значно підвищує автоматизацію, ефективність та розвиток нових технологій, що відображається на конкурентоспроможності підприємств. Впровадження штучного інтелекту дозволяє автоматизувати рутинні завдання виробництва, такі як монтаж, якість, контроль, та обробка даних, що призводить до підвищення ефективності та зниження витрат, дозволяє аналізувати великі обсяги даних та розробляти оптимальні стратегії виробництва та управління запасами, що призводить до зменшення витрат та підвищення ефективності. Штучний інтелект дозволяє прискорити процес розробки нових технологій шляхом аналізу даних та виявлення закономірностей, що може призвести до інноваційних рішень та покращень виробництва, дозволяє створювати нові технології, такі як автономні машини та роботи. Штучний інтелект може допомогти в оптимізації використання ресурсів, енергії та матеріалів, що призведе до зменшення витрат та негативного впливу на навколишнє середовище. «Наразі, використання штучного інтелекту у виробництві вже стало достатньо масовим, зокрема у сферах машинобудування, електрифікації та електроніки для прогнозування строків імовірного виходу з ладу обладнання й промислових активів» [2].

Цей комплексний підхід дозволяє створювати екосистему, в якій технології транспорту, енергетики та виробництва взаємодіють для досягнення спільних цілей сталого розвитку, таких як зменшення викидів, оптимізація використання ресурсів та створення більш чистого та ефективного середовища. Взаємодія технологій транспорту, енергетики та виробництва в рамках екосистеми стає ключовим чинником для досягнення глобальних цілей сталого розвитку, сприяючи збереженню природних ресурсів та забезпеченню життєздатності планети для майбутніх поколінь. Такий перехід вимагає синергії між різними галузями та долучення різних стейкхолдерів – виробників, споживачів, уряду та дослідників для спільного вирішення проблем сталого розвитку.

З початку 2020-х років існують кілька сучасних тенденцій у розвитку технологій машинобудування, де виробництво стає все більше

автоматизованим, використовуючи робототехніку та системи штучного інтелекту для вирішення завдань в машинобудуванні, що дозволяє створювати більш стійкі, ефективні та інноваційні виробничі процеси, що сприяє розвитку промисловості, конкурентоспроможності та зменшенню її негативного впливу на навколишнє середовище.

«Приклади застосування технологій штучного інтелекту в Україні є, хоча вони, поки що, поодинокі. Проекти застосування цифрових технологій реалізуються переважно окремими компаніями в рамках співробітництва з відомими компаніями виробниками сучасних рішень у сфері автоматизації технологічних процесів або розробників програмного забезпечення» [3].

### **Література**

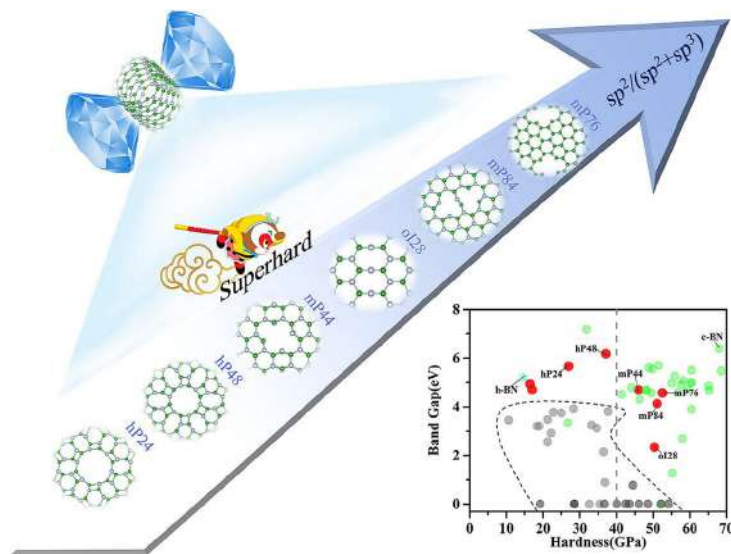
1. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/zelenij-perehid-ekologichni-ta-ekonomichni-perevagi-elektrotransportu-dlya-ukrainskih-gromad/>
2. <https://wezom.com.ua/ua/blog/shtuchnij-intelekt-u-virobnitstvi-perevagi-ta-prikladi-zastosuvannya>
3. Суходоля, О.М. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / О.М. Суходоля. – К. : НІСД, 2022. – 49 с.

*Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Полторацький В.Г.,  
Петасюк Г.А. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
Солод В.Ю., Кашинський І.С., Гумаров О.В. Дніпровський  
державний технічний університет, Кам'янське, Україна*

## **СУЧАСНІ РОЗРОБКИ В НАНЕСЕННІ ТА ЗАСТОСУВАННІ АНТИФРИКЦІЙНИХ ТА ЗАХИСНИХ БОР-НІТРИДНИХ ПОКРИТТІВ НА АБРАЗИВНІ ЗЕРНА ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ**

Покриття абразивних зерен для інструменту для алмазно-абразивної обробки є одним з важливих факторів впливу на зміну його властивостей та підвищення стійкості. В даній роботі нами приділена переважна увага на публікаціях, пов'язаних із нанесенням на абразивні зерна саме бор-нітридних покриттів (h-BN та c-BN), причому зупинилися на сучасних розробках 2023, адже цей напрямок останнім часом є важливим і актуальним.

Але спочатку звернемо увагу на розробку з створення нових гібридних структур BN [1]. Надтверді BN матеріали з регульованими властивостями можуть мати потенційне застосування за екстремальних умов. Вісім нових структур BN запропоновані шляхом полімеризації нанотрубок BN (BNNT), включаючи дві повністю  $sp^2$ -гібридаційні структури (tP14-BN і tP16-BN), дві повністю гібридаційні структури  $sp^3$  (hP24-BN і hP48-BN) і чотири гібридаційні структури  $sp^2/sp^3$  (mP44-BN, oI28-BN, mP76-BN і mP84-BN). Вперше повідомляється про чотири надтверді структури  $sp^2/sp^3$  BN (B:N = 1:1). Слід зазначити, що mP76-BN із твердістю 52,55 ГПа є найтвердішою структурою серед усіх зареєстрованих  $sp^2/sp^3$  гібридних структур BN (рис. 1). Крім того, oI28-BN, mP76-BN і mP84-BN демонструють високу в'язкість до руйнування. Це дослідження розкриває механізм переходу BNNT під високим тиском і теоретично представляє ефективний шлях для отримання шляхом гібридації  $sp^2/sp^3$  нових надтвердих алотропів BN.



**Рис. 1 – Схематичне представлення позицій нових надтвердих алотропів BN, отриманих шляхом полімеризації нанотрубок BN [1]**

З рис. 1 можливо уявити діапазон твердостей h-BN та c-BN, тому далі розглянемо публікації з нанесення плівок з цих матеріалів.

Так, в статті [2] досліджували енергію утворення та стабільність кластерів h-BN на 10 типах поверхонь перехідних металів. Результати показують, що кластери h-BN на різних металевих підкладах можуть зазнати переходу до найбільш стабільної структури при критичному розмірі, але він є різним для металевих підкладок. Найбільш стабільні структури для кластерів BN на поверхнях Cu, Pd і Co змінюються від ланцюгоподібної до  $sp^2$ -стільникової при

критичному розмірі  $n = 8, 7$  і  $8$  відповідно. Після цього стільникова структура стає найбільш енергетично вигідною і продовжує рости, поки не покриє весь субстрат. Дослідження зародження BN в атомному масштабі може бути корисним для планування експериментів з виготовлення плівок h-BN.

Отримати поверхню плавленого кремнезему на атомарному рівні з високою швидкістю видалення матеріалу (MRR) за допомогою хімічно-механічного полірування (CMP) є складним завданням. Для вирішення цього була розроблена нова суспензія для CMP на основі олеату калію та деіонізованої води з використанням абразиву  $\text{CeO}_2$ , покритого гексагональним нітридом бору (h-BN), який зменшує тертя в зоні контакту [3]. Церієві абразиви реалізували нову функцію надзмащування під час CMP завдяки цьому покриттю, запобігаючи пошкодженням і досягаючи надгладенької поверхні. Дослідження підтвердили, що товщина пошкодженого шару після CMP становить лише 2,7 нм. MRR при цьому становить  $31,92 \text{ мкм} \cdot \text{год}^{-1}$  під час CMP, а шорсткість поверхні Sa становить 0,124 нм після CMP.

В роботі [4] розглянута міжфазна взаємодія між алмазом і гексагональним нітридом бора (hBN). Слабка ван-дер-ваальсова (vdW) взаємодія між hBN і алмазом з водневими кінцевими групами (H-алмаз) забезпечує основу для введення кута закручування як нової степені свободи для модуляції властивостей гетероструктур. Результати засвідчили, що додаткові вільні орбіталі, які утворюються внаслідок спонтанної релаксації hBN при більшій деформації, викликаній скручуванням, можуть посилити vdW-зв'язок між hBN і H-алмазом, що буде сприяти переносу заряду на межі розділу, тим самим послабляючи поверхневе розсіяння домішок і збільшуючи накопичення дірок на поверхні H-алмаза.

Заключними у нашому невеликому огляді є дві публікації, присвячені захисним покриттям із застосуванням кубічного нітриду бору (c-BN). В статті [5] розглядалися тонкі плівки турбостратичного нітриду бору (t-BN) і кубічного нітриду бору (c-BN) вирощені на B-легованому полікристалічному та монокристалічному алмазі. Аналіз просвічуючої електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю показав, що тонкі плівки кубічного нітриду бору складаються із суміші фаз c-BN і t-BN, причому c-BN є домінуючою фазою. Ці висновки дають цінну інформацію про характеристики c-BN і алмазних інтерфейсів і мають важливе значення для управління температурою при їх застосуванні.

В роботі [6] розглянуті механічні і трибологічні властивості багатошарового композиційного покриття cBN/NCD (кубічний нітрид бору та нанокристалічний алмаз). Випробування на тертя і знос (рис. 2) засвідчили, що зносостійкість багатошарового композиційного покриття cBN/NCD пов'язана з залишковими напруженнями і в'язкістю руйнування, коефіцієнт тертя зберігає стабільність біля 0,12–0,15.

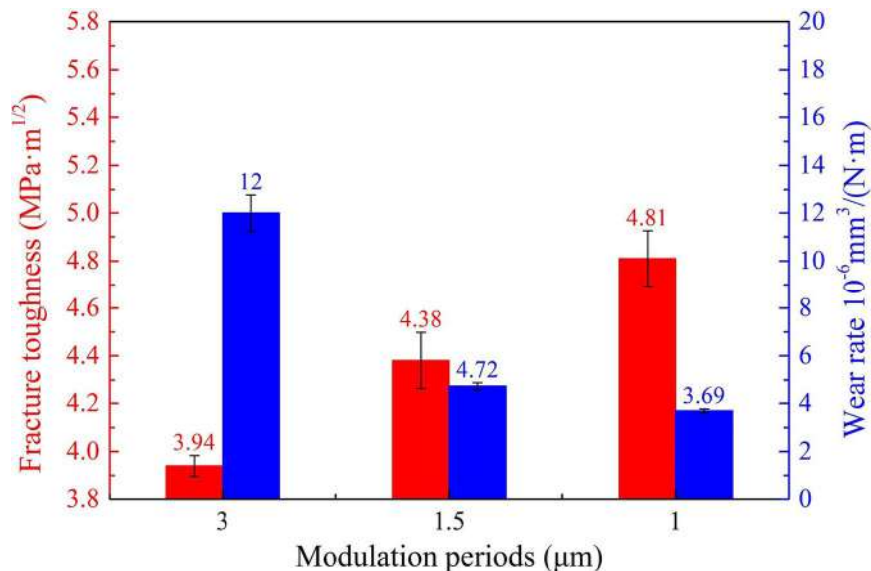


Рисунок 2 – Механічні характеристики покриття cBN/NCD [6]

## Література

1. Liu, Yuanyuan. Superhard BN allotropes with tunable hybridization  $sp^2/sp^3$  ratios by compressed nanotubes / Yuanyuan Liu, Dan Xu, Yuanyuan Wang, Kuo Hu, Zhen Yao // *Diamond and Related Materials*. – 2023. – Vol. 139, 9, 110313.
2. Hongxia, Zhu. Revealing the nucleation mechanism of CVD-prepared hexagonal boron nitride on transition metal surfaces: A study from DFT calculations / Zhu Hongxia, Chen Chong, Niu Jitai, Zhao Ruiqi // *Diamond and Related Materials*. – 2023. – Vol. 140, Part A, 110402
3. Liu, Jie. Novel green chemical mechanical polishing of fused silica through designing synergistic  $\text{CeO}_2/\text{h-BN}$  abrasives with lubricity / Jie Liu, Zhenyu Zhang, Chunjing Shi, Zheng Ren, Junyuan Feng, Hongxiu Zhou, Zhensong Liu, Fanning Meng, Shuming Zhao // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 637, 15, 157978.
4. Wang, Boyu. Twist angle modulated electronic properties and band alignments of hydrogen-terminated diamond (111)/hexagonal boron nitride heterostructures / Boyu Wang, Jing Ning, Jincheng Zhang, Chi Zhang, Dong Wang, Yue Hao // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 614, 30, 156245.

5. Guzman, Erick. Optical and acoustic phonons in turbostratic and cubic boron nitride thin films on diamond substrates / Erick Guzman, Fariborz Kargar, Avani Patel, Saurabh Vishwakarma, Dylan Wright, Richard B. Wilson, David J. Smith, Robert J. Nemanich, Alexander A. Balandin // *Diamond and Related Materials*. 2023.– Vol. 140, Part A, 110452.

6. Tian, Shuai. Effect of the modulation periods on the mechanical and tribological properties of cBN/NCD multilayer composite coating / Shuai Tian, Feng Xu, Zhenyu Ma, Qian Zhou, Yanchao Zhao, Zheng Li, Dong Wang, Guang Zeng, Dunwen Zuo // *Diamond and Related Materials*. – 2023. – Vol. 132, 109628.

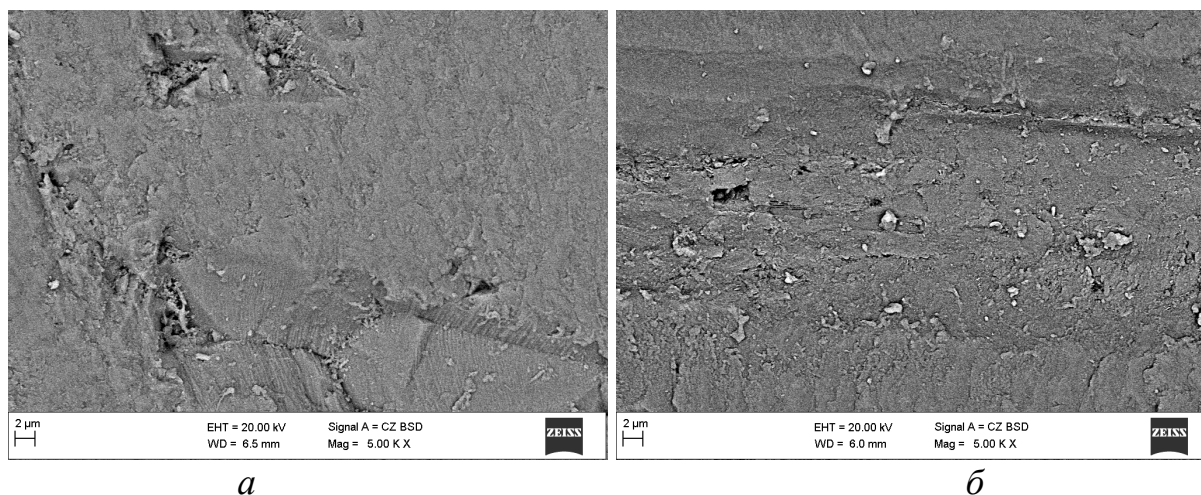
*Лавріненко В.І., Шейко М.М., Максименко А.П.,  
Рябченко С.В., Старик С.П., Білорусець В.В.,  
Ситник Б. В., Полторацький В.Г.* Інститут надтвердих  
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ПОВЕРХНІ CVD-АЛМАЗУ: ВИХІДНОЇ ТА ПІСЛЯ АЛМАЗНОЇ ОБРОБКИ**

CVD-алмази нині отримують певне застосування в алмазному інструменті, особливо правлячому, що відображено свого часу в огляді [1]. Згідно до GLOBAL CVD DIAMOND SALES MARKET REPORT в залежності від типу світовий ринок CVD-алмазів поділений на монокристалічні і полікристалічні сегменти. За прогнозами до 2026 р. обсяг світового ринку CVD-алмазів досягне 568,9 млн. доларів США, у порівнянні із 364,8 млн. доларів США у 2020 р. при середньорічному темпі зростання 7,7% в період з 2021 по 2026 рр.

Нас в даному випадку зацікавили полікристалічні CVD-алмази для зміцнення проблемних ділянок алмазного прецизійного правлячого інструменту. Оскільки вставки CVD-алмазів 0,8×0,8×1,0 мм отримані були нами від китайського виробника, то для більш свідомого застосування поверхня вставок була піддана аналізу на електронному мікроскопі. Зразки було досліджено методом сканувальної електронної мікроскопії при різному збільшенні на скануючому електронному мікроскопі ZEISS EVO 50XVP, укомплектованому енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCA450 з детектором INCAPentaFETx3 та системою HKL CHANNEL-5 для

дифракції відбитих електронів виробництва фірми OXFORD (скануюча електронна мікроскопія і мікроаналіз (SEMMA)) з додатковим використанням SE-детектора вторинних електронів Еверхарта-Торнлі та високочутливого 4-квadrантного фазового CZ BSD-детектора при різному збільшенні. Аналізу піддалися дві поверхні на одному зразку: вихідна (рис. 1, *а*) і шліфована (рис. 1, *б*). Елементний склад обох поверхонь наведений в табл. 1.



**Рис. 1 – Загальний вигляд поверхонь CVD-алмазу:**  
*а* – вихідна, *б* – шліфована

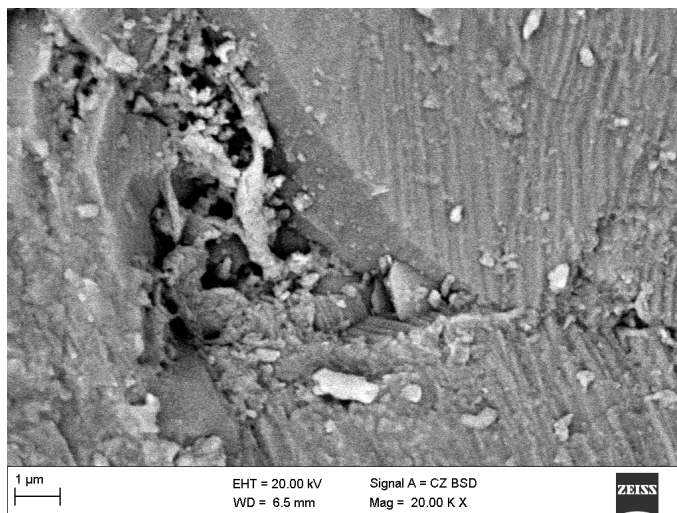
**Таблиця 1 – Елементний склад поверхонь**

Поверхня	Елементний склад (% за масою)		
	Карбон (C)	Кисень (O)	Алюміній (Al)
Вихідна	84,79	12,13	3,08
Шліфована	97,63	–	2,37

З фотографій поверхонь CVD-алмазів (див. рис. 1) та з даних таблиці можливо зробити наступні висновки:

На вихідній поверхні спостерігається полікристалічний її характер і навіть можливо побачити певні межі зерен, з яких складається сам полікристал. Особливо гарно це спостерігається при більшому збільшенні (рис. 2), де сходяться межі трьох CVD-зерен.

На вихідній поверхні CVD-алмазу спостерігається підвищена кількість кисню, чого немає на шліфованій поверхні. Тобто, саме поверхня CVD-алмазу, з-за підвищеної дефектності (див. рис. 2) має і просоченість киснем. У випадку шліфованої поверхні маємо зглажену поверхню (див. рис. 1, *б*) і повну відсутність на ній кисню.



**Рис. 2 – Загальний вигляд меж трьох CVD-зерен на вихідній поверхні**

Звернемо увагу і на те, що полікристалічні CVD-алмази містять невелику (в межах 2–3% за масою) кількість алюмінію. Можливо це є технологічними домішками.

### **Література**

1. Lavrinenko, V.I. CVD diamonds in diamond tools: features and properties, peculiarities of processing, and application in modern diamond tools (Review) / V. I. Lavrinenko // J. of Superhard Mat. – 2022.– Vol. 44, №. 6.– P. 65–87.

*Леценко О.І.* Приазовський державний технічний університет, Маріуполь–Дніпро, Україна

## **ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ЗМІННОЇ КРИВИЗНИ ПРИ ЇХ ОБРОБЦІ З ІДЕНТИЧНИМИ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ**

Систематична складова висоти профілю шорсткості поверхні при механічній обробці різанням залежить від багатьох факторів і може бути представлена, як сума:

$$\Delta H = H_S + \Delta h,$$

де  $H_S$  – розрахункова висота мікронерівності в залишковому перерізі зрізу;  $\Delta H = H_S + \Delta h$  – складова висоти мікронерівностей, пов'язана з пластичним відтиском.

При точінні фасонної поверхні високоміцних чавунних валків з кулястим або пластинчастим графітом (32–46 HRC), з постійними швидкістю різання, глибиною та зворотною подачею спостеріг-



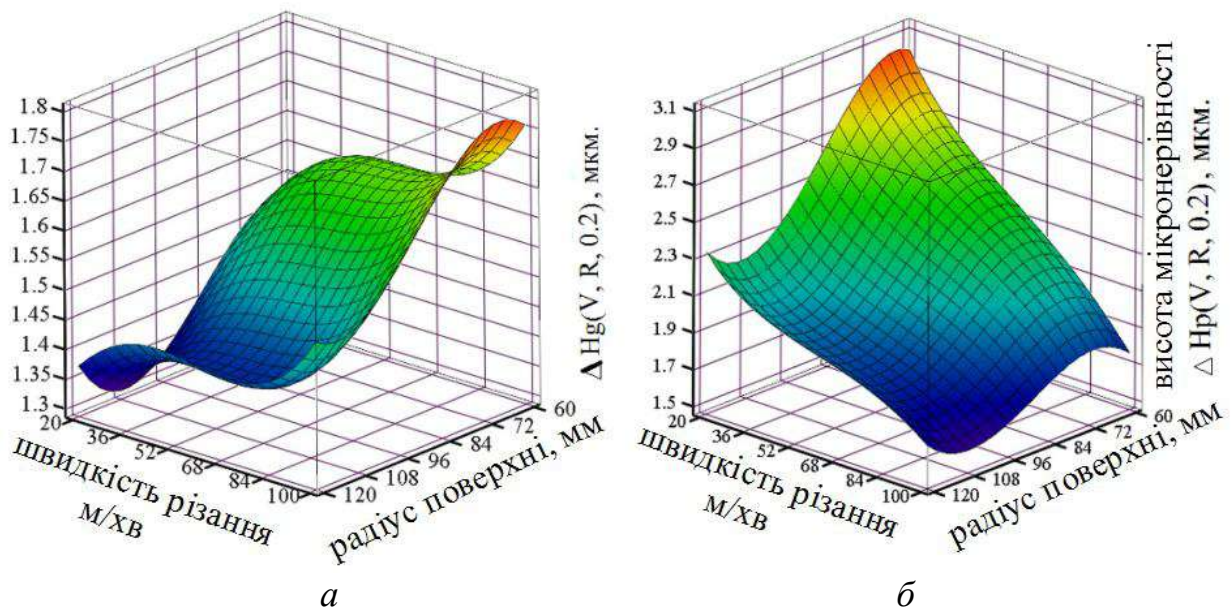
галася нижча шорсткість тороїдальної увігнутої поверхні, ніж шорсткість опуклої. Такі властивості поверхні були характерними для інших деталей з високою твердістю поверхні.

Для вирішення задачі виправлення даних негативних властивостей обробленої поверхні постало завдання їх дослідження. З цією метою заготівля з опуклою і увігнутою твірною, що складається з трьох сполучених радіусів, де  $R$  дорівнює 24, 36 і 50 мм, оброблялася з постійною швидкістю різання  $V$  з дискретного ряду 70, 90, 110 м/хв, з контурною подачею  $F$  відповідно 0,3, 0,2, 0,1 мм/об та глибиною різання  $m = 0,25$  мм. Поздовжня шорсткість визначалася на прецизійному профілометрі Surtronic 25 з додатковим програмним забезпеченням розширеного аналізу TalysrprofileA (рис. 1). За результатами вимірювань побудовано графіки зміни висоти мікронерівностей при обробці поверхні різного радіусу та поверхонь різної увігнутості (рис. 2).



**Рис. 1 – Вимірювання шорсткості  $R_a$  фасонної поверхні коли  $R$  дорівнює 24, 36, 50 мм переносним прецизійним профілометре SUYRONIC 25**

Як правило, висота мікронерівності в залишковому перерізі зрізу визначає гранично мінімальну шорсткість поверхні, отриману інструментом з даною геометрією, причому для опуклої поверхні  $H_p\_S$  вона вище, ніж для увігнутої  $H_g\_S$ . Ця різниця реально впливає на шорсткість поверхні до певного значення радіусу утворює фасонного профілю. Зі зростанням радіуса утворює  $R$  висота мікронерівностей у залишковому перерізі зрізу фасонної поверхні практично не відрізняється від висоти мікронерівностей поверхонь з прямолінійною утворюючою, і при обробці з контурною подачею  $F$  приблизно розраховується за відомою формулою. Зменшення подачі  $F$  також знижує відмінність мікрорельєфу фасонних поверхонь.



**Рис. 2 – Графіки зміни висоти мікронерівностей при обробці поверхні різного радіусу  $R$  (24, 36, 50 мм), з постійною контурною подачею  $F = 0,2$  мм/об, але зі змінною швидкістю різання  $V$  (24, 36, 50 м/хв), увігнутою  $\Delta H_g(V, R, F)$  (а) і опуклою  $\Delta H_r(V, R, F)$**

### ***Висновки.***

Аналізуючи дані вимірювань за графіками можна зробити наступний висновок: при обробці фасонної поверхні її шорсткість залежить від знака та радіусу кривизни – опуклості чи увігнутості. Зі зростанням швидкості різання  $V$  і зменшенням кривизни шорсткість зменшується для опуклої поверхні  $\Delta H_r$  і збільшується для увігнутої  $\Delta H_g$ , за інших рівних умов.

Підвищення межі плинності та зменшення зсувної міцності оброблюваного матеріалу призводить до збільшення мінімально досяжною висоти мікронерівностей. Водночас слід зазначити, що характер руйнування крихких матеріалів при розтягуванні та стисканні має різну природу. Можна припустити, що в процесі стружкоутворення при обробці фасонної поверхні діє умова, сформульована С. І. Губкіним – «у разі можливості переміщення точок деформованого тіла у різних напрямках, кожна його точка переміщається у напрямку найменшого опору»

## **ТЕХНОЛОГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ВИРОБІВ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Сучасна світова промисловість налічує не одну сотню компаній, що спеціалізуються на виробництві продукції для зварювання. Більшість із них знаходять доцільним диверсифікувати своє виробництво і не обмежуватися однією лише зварювальною продукцією, направивши частину ресурсів на виробництво суміжної, а іноді й зовсім не пов'язаної зі зварюванням продукції. Досить часто власне зварювальне виробництво стає стороннім, «непрофільним» виробничим підрозділом, але виконує технічні послуги – неруйнівний контроль і технічну діагностику (НК і ТД) виробів з різних матеріалів.

Доцільно було б проаналізувати: наскільки ефективні компанії України, що диверсифікують своє виробництво, зможуть задовольнити вимогам конкуренції підприємств в ЄС, зварювання на яких є одним з основних технологічних процесів?

Метою даного аналізу є розробка практичних рекомендацій з використання інструментів системи управління якістю у конкурентній розвідці в компаніях для підвищення їх конкурентоспроможності, ефективності діяльності та стратегічної стійкості для життєздатності.

У найпершу чергу зварювальне виробництво має дбати не про спрощення та зниження собівартості своїх виробів, а про необхідність зробити обладнання максимально безпечним в обігу і доступним за ціною, про збільшення товарообігу на складах своїх дистрибуційних центрів. Головний об'єкт досліджень – зварювальний процес, що створює самий зварний шов, вимоги до якого позначив замовник. Зварювальний апарат і електрод – не самоціль, а засіб досягнення поставленого завдання. Звичайно, під «завданням» треба розуміти не тільки технічне завдання того чи іншого зварювального проекту, але й проблеми, що стоять перед виробництвом в цілому.

Аналіз показав, що розроблена система для виробництва, зварювальна технологія і засоби її реалізації будуть затребувані багатьма виробниками зварних конструкцій, які мають схожі проблеми і вирішують аналогічні завдання з використанням НК і ТД.

Цінність «Збалансованої системи показників» BSC (balance, score, card) підходу визнана і підтверджена представниками проми-

словості багатьох країн світу, про це свідчать тисячі комплектів обладнання і сотні тонн зварювальних матеріалів, що виконують конкретні завдання на підприємствах зварних конструкцій замовників в різних галузях промисловості, але на зварювальних підприємствах України його ще не впроваджено.

Для досягнення успіху компанії в конкуренції на ринку продукції та послуг зварювального виробництва розроблено шляхи швидкого реагування на зміни в технології, що дозволять перевершувати конкурентів за якістю продукції, терміном надання послуг, асортиментом та ціною.

Оперативне вивчення інформації про діяльність підприємства і його положення на ринку дозволить керівництву визначити стратегію, сформулювати довгострокові цілі.

Попередній аналіз стану зварювального виробництва показав, що для створення системи поліпшення виробництва оптимальним є використання методології «Збалансованої системи показників» – BCS (balance, score, card) з візуалізацією досягнень за визначений період: зміну – місяць – квартал – рік з метою інформування в цехах та на дільницях.

На основі проведеного аналізу та досліджень системи BSC встановлено, що потрібно провести додаткові заходи щодо виконання програми підтримки галузевої політики в галузі машинобудування за допомогою міжнародних вимог BSC (balance, score, card) – додаток до стандарту ISO 9001:2015. Аналіз та дослідження системи BSC показали, що матеріальні активи в зварювальному виробництві відіграють тільки 15–20% в формуванні вартості продукції. Встановлено, що для успішного функціонування підприємства необхідні такі чинники: оцінка стану виробництва, оптимальні внутрішні процеси, компетентний персонал, налагоджена база споживачів продукції – зварних конструкцій та система 5 S разом з НК і ТД. Форма звіту збалансованих цільових показників в цеху зварювального підприємства BSC дозволяє постійно висвітлювати стан справ в підрозділах підприємства. Перед дослідженням системи BSC рекомендується скласти дорожню карту аналізу діяльності кожного підрозділу підприємства та стан охорони праці.

В результаті досліджень збалансованої системи показників (BSC) та аналізу процесного підходу встановлено також перелік процесів які є складовою частиною управління та постачання для внутрішніх процесів підприємств зварювального виробництва. Сформульовано та визначено наступні сегменти BSC зварювально-

го виробництва: підготовка персоналу зварювання, НК і ТД, фінансова ідентифікація, перелік внутрішніх процесів, перелік споживачів зварних виробів, нормативні вимоги до процесів зварювання та НК і ТД, які складають основу номенклатури технологічних процесів зварювання та технічних послуг. За результатами аналізу розроблено процедури підтвердження відповідності та оцінки стану виробництва зварної продукції різних типів, встановлено необхідність розробки процедури постійного моніторингу виробництва (внутрішній аудит) та комплекс інструкцій з вимірювання та перевірки основних параметрів. Встановлено, що згідно Закону України «Про стандартизацію», в зварювальному виробництві для побудови системи BSC та чотирьох сегментів зварювального виробництва необхідно використовувати гармонізовані міжнародні нормативні документи для виконання безпечних та якісних елементів та процесів випуску продукції з врахуванням НК і ТД.

На підставі проведених досліджень запропоновано систему ключових показників технологічного управління якістю в зварювальному виробництві, яка формується за висновками аналізу технологічних процесів виготовлення зварних виробів та НК і ТД. Запропоновано структуру процесів верхнього рівня, пов'язаних з управлінням, постачанням, виробництвом, моніторингом зварювального виробництва та контролем експлуатаційних характеристик зварних конструкцій. Результати досліджень використано при розробці рекомендацій та впровадженні заходів з поліпшення системи управління виробництвом металевих будівельних конструкцій. Проведено дослідження вимог і методів системи BSC для візуалізації результатів виробництва, згідно з системою поліпшення зварювання та монтажу конструкцій після підготовки виробництва для проведення технічного нагляду (моніторингу) за сертифікованою структурою підприємства по ISO 9001:2015. За аналізом факторів підвищення якості продукції та виробів для машинобудування, зважаючи на суттєвість людського фактору, сформовано політику та цілі в сфері якості вищого керівництва; мотивації персоналу та розуміння завдань в цій сфері спеціалістами підприємства; рівень координування зварювальних робіт; систему перепідготовки та атестації зварників, спеціалістів з НК і ТД. При цьому визначено вимоги до розробки програм підтвердження відповідності технологій зварювання, базуючись на впроваджених міжнародних стандартах, враховуючи межі придатності різних схем атестації технологічних процесів зварювання для різних типів продукції та виробництв.

Для доступу зварних конструкцій на ринок ЄС необхідно забезпечити виробництво якісними технологічними процесами зварювання, які гарантують їх бездефектність.

У переважній більшості в будівельних конструкціях переважають з'єднання з короткими та замкнутими швами, розміщеними в різних просторових положеннях. Основними проблемами в таких з'єднаннях є недостатність провару в початковій та кінцевій частинах швів, пори та шлакові включення. Ці дефекти суттєво погіршують якість зварних конструкцій.

На даний час до технологій, що забезпечують одержання якісних бездефектних швів відносяться імпульсно-дугові процеси в аргоні, суміші аргону з  $\text{CO}_2$  та в  $\text{CO}_2$  тонким дротом з примусовим керуванням термічним циклом при умові використання якісних (сертифікованих) захисних газів, дротів та зварювальних апаратів.

При використанні технологій та апаратури без керування струмом та термічним циклом, неякісних (не сертифікованих) зварювальних газів, дротів та джерел живлення, а також при відсутності контролю за виконанням зварювання в з'єднаннях зустрічаються непровари, пори та інші дефекти.

Основними причинами пор є недостатній захист зони зварювання від повітря. При обстеженні виробництв виявлено, що в баллонах з  $\text{CO}_2$ , які поставлені без сертифікатів, часто відмічають підвищений вміст повітря та вологи, ніж це зазначено ДСТУ 4817:2007. Причиною цього в більшості випадків є порушення технології наповнення баллонів  $\text{CO}_2$ . Баллони перед заповненням недостатньо очищують та не осушують, технології заправки не атестовані.

Аналіз технологій зварювання в  $\text{CO}_2$  та в суміші аргон- $\text{CO}_2$  виявив, що пори в швах з'являються також під час виконання зварювання на підвищених режимах та за недостатньої подачі захисного газу ( $\text{CO}_2$  або суміші аргон- $\text{CO}_2$ ).

Настройка та супровідний контроль режиму зварювання проводяться за допомогою апаратів на робочих постах (вольтметр, амперметр та регулятор подачі захисного газу). Часто ці прилади не забезпечують достатньої точності параметрів режимів зварювання.

Забезпечити одержання якісних бездефектних зварних конструкцій та вихід на ринок Європи можливо при умові організації робіт із виготовлення конструкцій згідно НД та їх виконання.

Окрім того потрібно використовувати Технічний регламент низьковольтного електричного обладнання, введений Законом України

та план заходів із його застосування. При проведенні сертифікації необхідно визначати не тільки параметри безпеки продукції, а також – якості технологічних характеристик зварювального обладнання та якості технологічних процесів зварювання, від яких залежить виготовлення зварних конструкцій з допустимим рівнем дефектів.

При цьому треба враховувати, що в ЄС діє принцип презумпції відповідності (виробник гарантує відповідність зварної конструкції всім параметрам безпеки та вимогам якості згідно НД).

В разі порушення принципу презумпції відповідності виготовленої конструкції на підприємство – виробник накладається штраф до 70 млн євро.

*Лопата Л.А., Качинська І.Р.* Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України, Київ  
*Солових Є.К.* Центральнoукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## **ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗМІЦНЮЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Нанесення покриттів на поверхню конструктивного елемента вносить цілий ряд складнощів і невизначеностей при проектуванні конструктивних елементів деталей машин і механізмів з покриттями і прогнозуванні їх властивостей. Це пов'язано з особливостями системи «зміцнювана поверхня – покриття», передусім з наявністю адгезійного контакту на межі розділу різнорідних матеріалів і неаддитивності її властивостей [1]. Відмінність теплофізичних і механічних властивостей матеріалу зміцнюваної поверхні і окремих шарів покриття є причиною того, що в таких системах практично завжди при будь-яких схемах термічного або механічного навантаження є залишкові напруження, нерівномірно розподілені за об'ємом матеріалу [2].

Неоднорідність напружено-деформованого стану системи «зміцнювана поверхня — покриття» може згладжуватися або посилюватися в процесі тривалого високотемпературного навантаження, що пов'язано з розвитком дифузійних процесів. Інтенсивність цих процесів визначається відмінністю хімічного складу зв'язаних шарів покриття і зміцнюваної поверхні, і у ряді випадків ці процеси можуть стати причиною руйнування або відшаровування покриття [3].

Другою важливою особливістю композиції «зміцнювана поверхня – покриття» являється прояв за певних умов фізичних ефектів, пов'язаних із створенням енергетичних бар'єрів на шляху руху дислокацій в основі і виходу їх на поверхню. Нанесення шарів покриття з високим модулем пружності уповільнює вихід дислокацій на поверхню основного матеріалу і їх переміщення в зміцнюваних поверхневих шарах, а також блокує поверхневі джерела дислокацій. Це призводить до багатократного зниження межі міцності.

Третьою особливістю є ряд технологічних чинників, таких, як температура зміцнюваної поверхні, температура і тривалість дифузійних процесів на різних етапах нанесення покриття, параметри механічної обробки зміцнюваної поверхні з покриттям, її стан після обробки і деяких інших. При цьому властивості покриття можуть значно відрізнятися від властивостей початкового матеріалу зміцнюваної поверхні.

Найбільш розвинені підходи до вивчення деформації і руйнування зміцнюваної поверхні з одношаровим покриттям при його навантаженні в області пружних деформацій. Аналіз напружено-деформованого стану дозволить встановити зв'язок характеру руйнування системи з фізико-механічними характеристиками покриття і зміцнюваної поверхні, а також із співвідношенням їх товщини [3].

Практично усі розроблені критерії граничного стану системи "покриття – зміцнювана поверхня" не передбачають обліку усіх перелічених вище чинників, що визначають несучу спроможність, міцність і довговічність цієї системи [3]. Поки не вдалося встановити кількісний зв'язок між характером розвитку дифузійних процесів на межі розділу "покриття – зміцнювана поверхня", інтенсивністю генерування і переміщення дислокацій в твердому тілі (в зміцнюваній поверхні", структурними особливостями окремих шарів покриття і міцностними параметрами системи "зміцнювана поверхня – багатшарове покриття" [3].

Таким чином, на теперішній час кількісний облік усіх чинників і параметрів дифузійних процесів, фізичних ефектів, статистичного аспекту руйнування, структурних особливостей зміцнюваної поверхні і окремих її складових, закономірностей тріщиноутворення в покритті, неоднорідності напружено-деформованого стану зміцнюваної поверхні з покриттям як при ізотермічному, так і при термоциклічному навантаженнях у рамках єдиного підходу доки неможливий.

Останнім часом для вивчення таких складних систем і встановлення кількісного зв'язку досліджуваних незалежних змінних з од-



нією або декількома залежними останнім часом все ширше використовуються методи математичного планування експерименту. Це дозволяє вирішити завдання вибору оптимальних конструктивно-технологічних чинників технології зміцнення шляхом нанесення покриттів за параметрами міцності з урахуванням розрахованих на основі експериментальних даних математичних моделей та вказаних чинників, що встановлюють зв'язок, і міцностних параметрів [4]. Це стає можливим у разі узагальнення встановлених кількісних співвідношень між конструкційно-технологічними чинниками процесу нанесення покриття і міцностними характеристиками даної поверхні з покриттям, передусім на основі аналізу її напружено-деформованого стану [3].

Зіставлення отриманих експериментальних даних дозволяє встановити принципи зниження або підвищення несучої здатності системи «зміцнювана поверхня – покриття», і внести такі зміни в схему конструкції багат шарового покриття, завдяки яким вдається досягти одноріднішого розподілу напружень по перерізу деталі і понизити розтягуючі напруження в окремих шарах покриття.

У разі вивчення покриттів, матеріал окремих шарів яких відрізняється не лише фізико-механічними характеристиками, але і типом кристалічної решітки, прикладом чого можуть служити композиції типу метал – кераміка, дуже важливе значення має дослідження процесів тріщиноутворення і руйнування керамічного шару і їх впливу на закономірності деформації і руйнування поверхні з покриттям в цілому. Це досягається спостереженням за станом поверхні зразка з покриттям безпосередньо в процесі його випробувань як при ізотермічному, так і при термоциклічному режимах навантаження. У подальшому, важливу інформацію дозволяє отримати використання металографічних і фрактографічних методів досліджень. Електронна фрактографія – часто єдиний метод, що дозволяє відповісти на питання про причини і механізми втрати стійкості матеріалу у вершині тріщини. Кількісна стереофрактографія дає можливість не лише скласти достовірніше судження про процеси руйнування на якісному рівні, але і отримати унікальні кількісні дані локальних руйнувань.

Таким чином, перспективним видається двосторонній підхід до вивчення системи «зміцнювана поверхня — покриття» і прогнозування її властивостей, тобто встановлення кількісної залежності механічних властивостей системи від конструктивно-технологічних чинників її створення.

Дослідження механічних властивостей системи "покриття-деталь" необхідно для конструювання деталей з покриттями за параметрами міцності і є одним з найбільш важливих етапів, який дозволяє об'єктивно судити про механічну поведінку деталей при експлуатації, управляти їх міцністю шляхом дії на склад, структуру, властивості і технологію отримання покриттів. Визначення механічних властивостей деталей з покриттями спрямовано на отримання, як правило, однієї міцностної характеристики (адгезійної міцності).

### **Література**

1. Матеріал "подложка-покрытие" с позиций системного анализа. Composition "substrate-coating" from the position of system analysis // Metalurgija Zagreb. – 2012. – 51. – №3. – С. 387.
2. Сорока, Е.Б. Пути повышения самоорганизации системы основа-покрытие / Е.Б. Сорока // Прочность материалов и элементов конструкций : тр. Международ. науч.-техн. конф., 28–30 сентября 2010, г. Киев. – Киев : ИПП НАН Украины, 2011. – С. 561–573.
3. Покрытия и их использование в технике / под ред. В. Т. Трощенко. – Киев : Академперіодика, 2006. – С. 981–1074.
4. Лапач, С.М. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.М. Лапач, С.Г. Радченко, Р.В. Галайда. – Київ : НТУУ „КПІ”, 2007. – 116 с.

*Лопата В.М.* Інститут електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ  
*Солових А.Є.* Центральноукраїнський національний  
технічний університет, Кропивницький  
*Лопата О.В.* Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## **ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ ДВИГУНІВ**

Аналіз зносу деталей двигунів показав, що існує потреба у відновленні поверхонь найбільш затребуваних деталей, що часто виходять з ладу, таких як розподільні вали. Розробка та впровадження маловитратних технологічних процесів відновлення та зміцнення

розподільних валів двигунів, пошук нових та удосконалення існуючих методів їх ремонту та відновлення, що базуються на останніх наукових дослідженнях у галузі нанесення захисних покриттів, актуальне завдання. Вирішення цього завдання забезпечує зниження витрат дорогих матеріалів та енерговитрат процесу відновлення при підвищенні його продуктивності з гарантією високих показників надійності відремонтованих виробів.

Одним з основних напрямків підвищення довговічності та ресурсу двигунів є удосконалення низьковартісних технологічних процесів відновлення їх розподільних валів у поєднанні з використанням найбільш доступних та дешевих матеріалів, що забезпечують зниження витрати дорогих матеріалів та енерговитрат процесу відновлення при підвищенні його продуктивності з гарантією високих показників надійності відремонтованих деталей. Використання відновлених деталей дозволяє зменшити витрати на запасні частини. Умови експлуатації розподільних валів визначають знос їх робочих поверхонь, ремонт яких складає 60% існуючих технологічних процесів відновлення. Використання технологічних процесів ремонту із застосуванням технології електродугового напилення забезпечує ремонтне виробництво двигунів змінно-запасними деталями. Ремонт складає основу експлуатаційної надійності та включає не тільки відновлення геометричних розмірів розподільних валів двигунів, а й підвищення їх експлуатаційних характеристик.

При відновленні та підвищенні експлуатаційних властивостей двигунів доцільно використовувати в якості покриттів сталь 40X13. Вибір сталей мартенситного класу 40X13 для зносостійких покриттів обумовлений їхньою здатністю до структурно-фазових аустенітно-мартенситних перетворень.

Технологічний процес відновлення розподільних валів електродуговим напиленням складається з наступних операцій: підготовка дроту; очищення деталей; дефектація; попередня механічна обробка; дробоструменева обробка; контроль напилених поверхонь; чистова механічна обробка поверхонь з покриттям. При розробці технології відновлення розподільних валів двигунів вразовується конструкція валу, властивості матеріалів валу та покриття, розміри покриття та інш. Процес електродугового напилення полягає в плавленні дроту електричною дугою та розпиленні розплавленого металу струменем, утвореним продуктами згоряння пропано-повітряної суміші, з подальшим транспортуванням потоку частинок розплавленого металу до поверхні валу, що відновлюється (рис. 1).



**Рис. 1 – Процес відновлення розподільного валу електродуговим напиленням**

Основні фізико-механічні властивості отриманих поверхонь з покриттям, представлені в табл. 1. Лабораторні та стендові випробування розподільних валів показали, що зносостійкість їх відновлених поверхонь у 2,5–5,0 разів вища, ніж поверхонь, відновлених газополуменевим напиленням та в 1,5–1,7 раза – порівняно з новими валами (табл. 2). Термін служби розподільних валів з покриттями (рис. 2) збільшився в 2,5–3,0 рази.

**Таблиця 1 – Характеристики відновлених поверхонь з електродуговим покриттям**

Найменування характеристики	Значення
Мікротвердість, МПа	HV 800
Контактні навантаження, МПа	до 100 при наявності ударів
Степень окислення покриття, %	до 3
Міцність зчеплення, МПа	60–70
Товщина покриття, мм	0,5–4,0

**Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості відновлених валів**

Деталь	Матеріал	Міцність зчеплення, МПа	Середнє значення зносу, мм
Розподільний вал новий	сталь 45	–	0,05–0,15
Розподільний вал відновлений		220	0,01–0,02

На підставі досліджень розроблено технологічну інструкцію для відновлення розподільного валу та практичні рекомендації щодо використання розробленої технології відновлення на ремонтних

підприємствах. Розроблена технологія відновлення розподільних валів двигунів розширила номенклатуру відновлюваних деталей і дозволила відновлювати не тільки розподільні вали двигунів, а й розподільні вали будь-яких засобів транспорту, організувати ділянки відновлення деталей на ремонтних підприємствах.



**Рис. 2 – Розподільний вал 14-04-20-1 двигуна Д-160.111-1:**  
*а* – відновлений; *б* – після механічної обробки

*Людвіченко О.П., Лещук О.О., Гордєєв С.О.,  
Петруша І.А.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

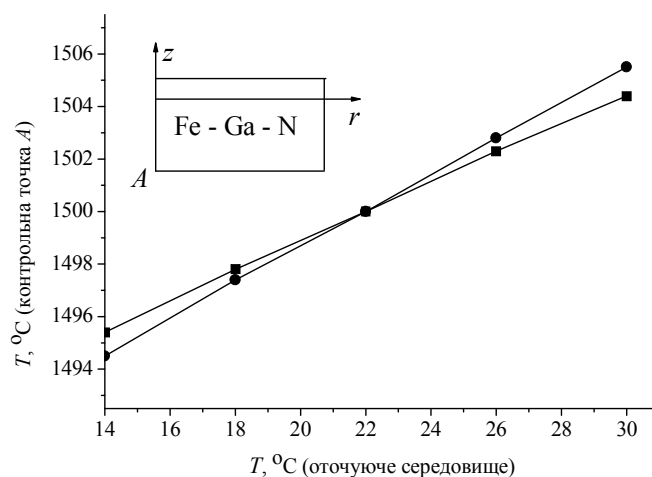
## **ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЕПЛОВИЙ СТАН КОМІРКИ АВТ ТОРОЇДАЛЬНОГО ТИПУ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ GaN З РОЗЧИН-РОЗПЛАВНОЇ СИСТЕМИ Fe–Ga–N**

На сьогодні суттєвий інтерес викликають твердотільні напівпровідники для створення екстремальної електроніки. Один із них – нітрид галію (GaN), який завдяки ширині забороненої зони у 3,4 eV здатен зберігати робочі характеристики до 300 °С. На теперішній час відсутня доступна технологія створення монокристалів GaN. Пошук нових методів синтезу якісних монокристалів GaN є актуальним питанням. Проведені експерименти в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України підтвердили перспективність синтезу монокристалів GaN в умовах високого тиску (~5 ГПа) і високої температури (~1500 °С), де в якості ростової системи використано розчин GaN в розплаві Fe. Зростання кристалів відбувалося в температурному градієнті. Робочу температуру забезпечували електрорезистивним

нагріванням. Для визначення і оптимізації параметрів електрорезистивного ланцюга скористались чисельним моделюванням. В [1, 2] наведені основні результати скінченно-елементного моделювання теплового стану комірки апарата високого тиску (АВТ) тороїдального типу при вирощуванні кристалів нітриду галію. Зокрема в [1] досліджено вплив варіювання концентрації графіту в композиційних торцевих нагрівачах на тепловий стан комірки. В [2] визначено вплив на тепловий стан комірки зміни діаметра графітової частини комбінованого торцевого нагрівача.

Метою роботи є визначення впливу температури оточуючого середовища на тепловий стан комірки АВТ при кристалізації GaN з розчин-розплавної системи Fe–Ga–N при застосуванні в електрорезистивних ланцюгах композиційних і комбінованих торцевих нагрівачів.

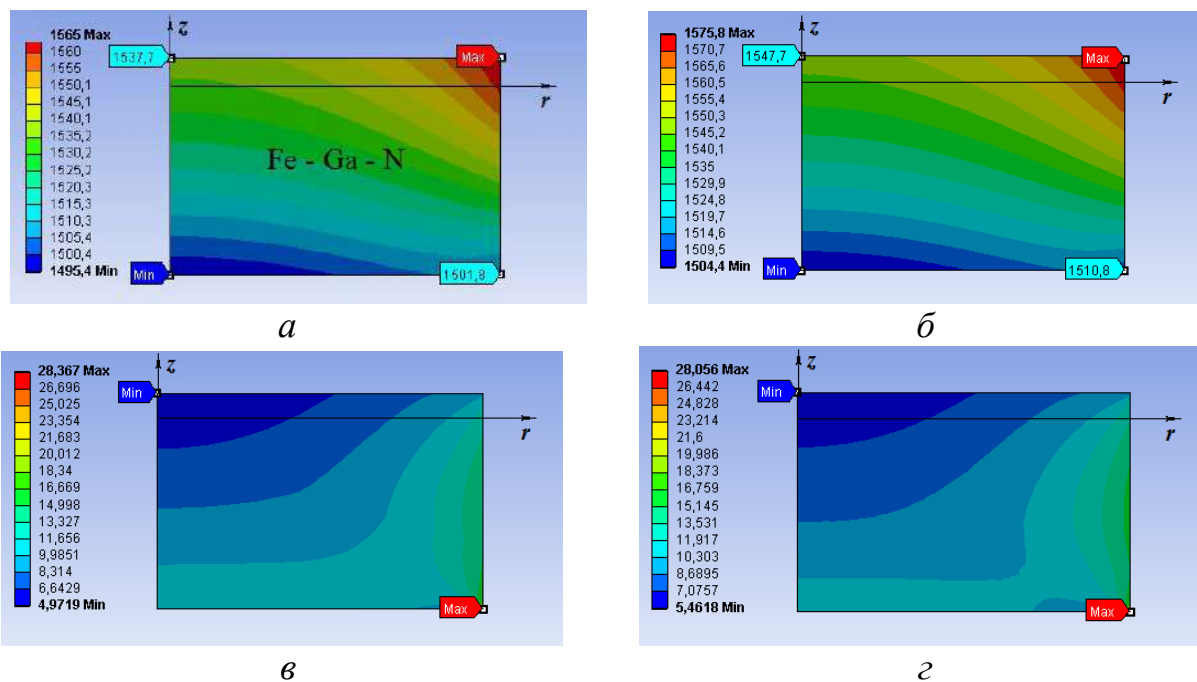
З використанням розробленої методики скінченно-елементного моделювання електрорезистивного нагрівання АВТ для розрахункових схем, описаних в [1, 2], визначені поля температури і градієнта температури за умови зміни температури оточуючого середовища в інтервалі 14–30 °С. На рис. 1 наведено залежність зміни температури в контрольній точці *A* від температури оточуючого середовища для двох типів торцевих нагрівачів. Температура в контрольній точці *A* (див. рис. 1) становить 1500 °С за температури оточуючого середовища у 22 °С.



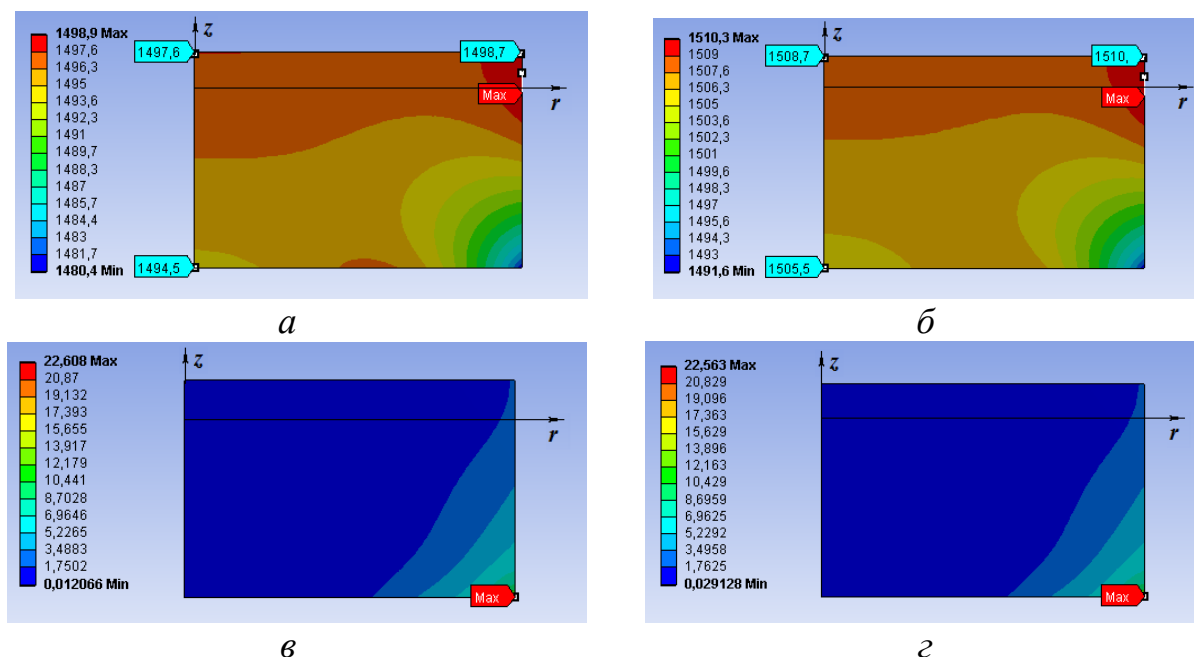
**Рис. 1 – Зміна температури в т. *A* в залежності від температури оточуючого середовища: ■ – за використання композитних нагрівачів; ● – за використання комбінованих нагрівачів**

На рис. 2 наведено поле температури і градієнта температури в ростовому об'ємі за умови використання композиційних нагрівачів:

$a$  – поле температури і  $b$  – поле градієнта температури за температури оточуючого середовища у  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  і  $\varepsilon$  – відповідні поля за температури оточуючого середовища у  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За аналогічних умов, тільки при використанні комбінованих торцевих нагрівачів, визначені поля температури і градієнта температури для ростового об'єму (рис. 3).



**Рис. 2 – Поля температури ( $a$ ,  $b$ ) і градієнта температури ( $v$ ,  $z$ ) у ростовому об'ємі комірки за використання композиційних нагрівачів**



**Рис. 3 – Поля температури ( $a$ ,  $b$ ) і градієнта температури ( $v$ ,  $z$ ) у ростовому об'ємі комірки за використання комбінованих нагрівачів**

Таким чином, визначено, що зміна температури оточуючого середовища в інтервалі 14–30 °С несуттєво впливає на топологію полів температури і градієнта температури (див. рис. 1, 3). Температура в контрольній точці *A* (див. рис. 1) змінюється лінійно в інтервалі 1495,4–1504,4 °С в разі використання композитних нагрівачів і в інтервалі 1494,5–1505,5 °С в разі використання комбінованих нагрівачів. Отримані результати засвідчують необхідність врахування температури оточуючого середовища при проведенні експериментів з кристалізації GaN.

### **Література**

1. Людвіченко, О.П. Моделювання теплового стану комірки апарата високого тиску при вирощуванні кристалів нітриду галію / О.П. Людвіченко, О.О. Лещук, С.О. Гордєєв // Технічна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 57–66.

2. Людвіченко, О. П. Дослідження теплового стану комірки апарата високого тиску з використанням комбінованих нагрівачів при вирощуванні кристалів нітриду галію / О.П. Людвіченко, О.О. Лещук, С.О. Гордєєв, І.А. Петруша // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. Праць. – Київ : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 245–252.

*Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту «Монокристали нітриду галію GaN: отримання під високим тиском, структура, властивості» (2020.02/0078)*

*Майстренко А.Л., Заболотний С.Д., Нікітюк Ю.А.,  
Старик С.П. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна*

## **ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІ-ШУВАННЯМ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ТА УСУНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НА ЛИТИХ КОРПУСНИХ ВИРОБАХ З МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МЛ10**

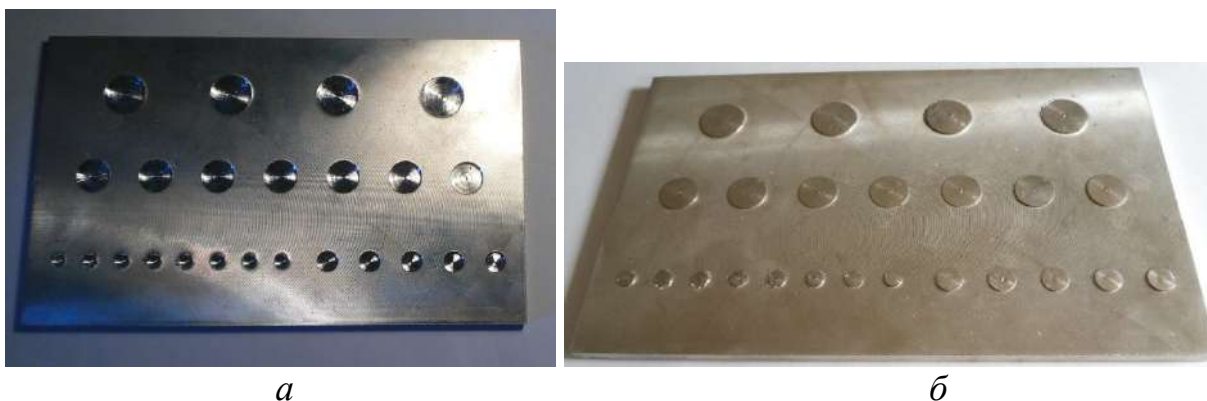
У якості об'єкта дослідження було вибрано ливарний сплав МЛ10, який широко використовується в авіаційній і космічній техніці. При традиційних методах електрозварювання цей сплав пово-



дить себе надзвичайно складно, утворюючи в зонах колошовної зони раковини та тріщини, які викликані дією залишкових термічних напружень.

При виготовленні відливок з цього сплаву через особливості технологічного процесу спостерігається значний вихід браку через наявність поверхневих дефектів у вигляді раковин і тріщин.

Для перевірки можливості усунення поверхневих дефектів у магнієвому сплаві МЛ10 була виготовлена пластина з фрезерованими отворами, що імітують поверхневі раковини-дефекти, в які запресовувались пробки виготовлені з цього ж сплаву (рис. 1).



**Рис. 1 – Загальний вигляд пластини з сплаву МЛ10 з отворами під пробки, що імітують поверхневі раковини-дефекти:**  
*а* – з отворами, *б* – з запресованими пробками

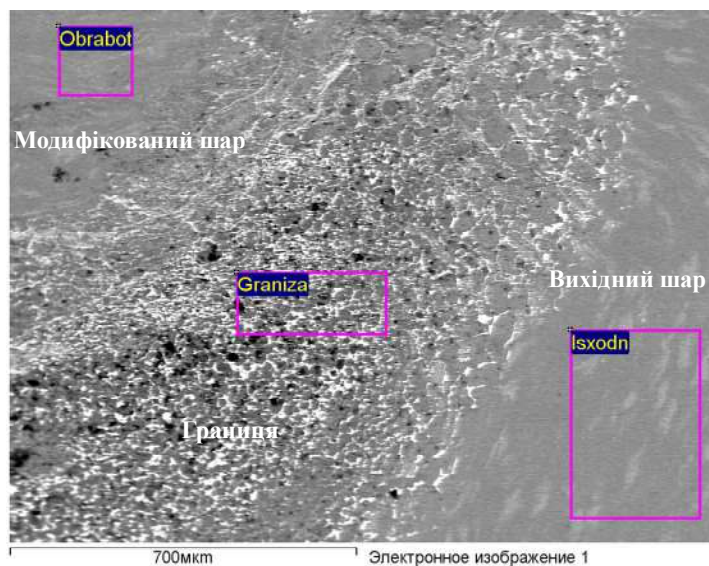
Після цього по лініям розподілу пробок виконали проходи інструментом для зварювання тертям з перемішуванням з піном діаметром в основі 4 мм, висотою 3 мм та діаметром бурта 12,5 мм з кроком 4 мм на глибину 3 мм. Оброблена таким чином пластина показана на рис. 2.



**Рис. 2 – Загальний вигляд заварювання тертям з перемішуванням запресованих пробок у пластині сплаву МЛ10, що імітують поверхневі раковини-дефекти:** *а* – процес заварювання, *б* – загальний вигляд заварених пробок

Після обробки тертям з перемішуванням поверхневого шару ливарного магнієвого сплаву МЛ10 було виготовлено зразки з модифікованою структурою для подальшого визначення ступеню впливу модифікації сплаву на зміну його структурного стану.

Отримані методом дифракції відбитих електронів при застосуванні растрового електронного мікроскопу фірми ZEISS EVO електронні зображення прояву границь зерен модифікованого та вихідного шару магнієвого сплаву МЛ10, засвідчують про високу ступінь впливу модифікації на зміну структурного стану сплаву. Внаслідок обробки тертям з перемішуванням поверхневого шару виробів розміри його зерна в зоні обробки зменшуються до 16 разів (рис. 3), що забезпечує необхідну міцність з'єднання.



**Рис. 3 – Зображення модифікованої структури зразка МЛ10**

Формування принципово іншої структури – дрібнодисперсної, близької до рівновісної (на відміну від волокнистої витягнутої в напрямку деформації при прокатці сплаву) відбувається завдяки подрібненню зерен основного металу в результаті пластичної деформації в процесі ЗТП, що дозволяє одержати більш високі властивості міцності й пластичності металу шва в порівнянні з традиційними методами електрозварювання

Виконані випробування довели технічну можливість використання метода тертя з перемішуванням спрямованого на зварювання деталей виробів з магнієвого сплаву МЛ10 при температурах удвічі менших за температуру плавлення, модифікацію структури цього сплаву у вигляді подрібнення зерен та усунення поверхневих дефектів, зокрема, на литих корпусах.

*Манохін А.С., Клименко С.А., Чумак А.О.,  
Рижов Ю.Е.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ НА ПАРАМЕТРИ МЕХАНІКИ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ЗОНІ РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТОМ ІЗ PсVN**

Дане дослідження спрямовано на встановлення основних параметрів механіки контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом і оцінку впливу зміни трибологічних характеристик на поверхнях тертя внаслідок зміни коефіцієнту тертя  $f$  на контактних поверхнях інструменту. Це пов'язано з окисненням окремих фаз, що входять до складу PсVN, яке відбувається за високих (800–1000 °С) температур в зоні різання і супроводжується появою поліоксидних плівок, таких як  $MeO_x$ ,  $V_2O_3$ , які виконують функцію твердого змащення на контактних поверхнях інструменту [1]. Значний об'ємний вміст керамічної фази, що оточує окремі частинки сVN робить цілком імовірним існування механізму, коли продукти окислення компонентів зі складу керамічної матриці, у вигляді вторинних структур [2] нанометричної товщини, вкривають більшу частину площі контактних зон інструмент-стружка та інструмент-оброблювана поверхня та здатні суттєво вплинути на коефіцієнт тертя на границі розділу у зоні різання. Як наслідок, значення контактних напружень, ступінь деформації оброблюваного матеріалу та сили різання значно змінюються.

Для оцінки впливу коефіцієнту тертя на вказані параметри контактної взаємодії у зоні різання величина  $f$  змінювалась у діапазоні від 0,4 до 0,1. 2D моделювання проводилось в постановці плоских деформацій при обробці з товщиною зрізу 0,035 мм та швидкість різання 200 м/хв. Модель різця розміром 0,4×0,4 мм абсолютно жорстка та нерухомо закріплена, передній та задній кути інструмента  $-10^\circ$  та  $10^\circ$ , радіус заокруглення різальної кромки 10 мкм. Коефіцієнт конвективної теплопередачі  $0,02 \text{ Вт/мм}^2 \cdot \text{К}$ , між різцем та стружкою враховано теплообмін, коефіцієнт теплопередачі на поверхні контакту інструмент-оброблюваний матеріал  $45 \text{ Вт/мм}^2 \cdot \text{К}$ . Взаємодія на контактних поверхнях відповідає зовнішньому тертю з коефіцієнтом  $f$ , що має постійне значення. Впливу оброблюваного матеріалу на значення досліджуваних параметрів, які характеризують контактну взаємодію та їх відповідність експериментальним даним,

враховано шляхом використання коефіцієнтів для емпіричної моделі Джонсона-Кука для загартованої сталі AISI52100 (аналог ШХ-15) ([3]:  $A = 774,78$  МПа;  $B = 134,46$ ;  $C = 0,0173$ ;  $n = 0,371$ ;  $m = 3,17$ ).

З метою наближення умов деформування в зоні різання до реальних параметрів та отримання сегментної стружки при моделюванні було використано критерій руйнування за Броззо, який встановлює залежність руйнування від найбільшого головного напруження і гідростатичного напруження:

$$D = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_m)} d\varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  – розмір еквівалентної пластичної деформації;  $\sigma_1$  – найбільше головне напруження;  $\sigma_m$  – гідростатичного напруження. Руйнування елемента починається при  $D$ , рівному прийнятому критерію, і дані елементи видаляються з подальшого розрахунку. Тестування зазначеного підходу при величині  $D = 0,15$  демонструє зміну типу стружки на сегментну, яка спостерігається на практиці.

На рис. 1 зображено загальний вид стружки, отриманої при значеннях коефіцієнту тертя  $f = 0,10$  (а) та  $f = 0,35$  (б).

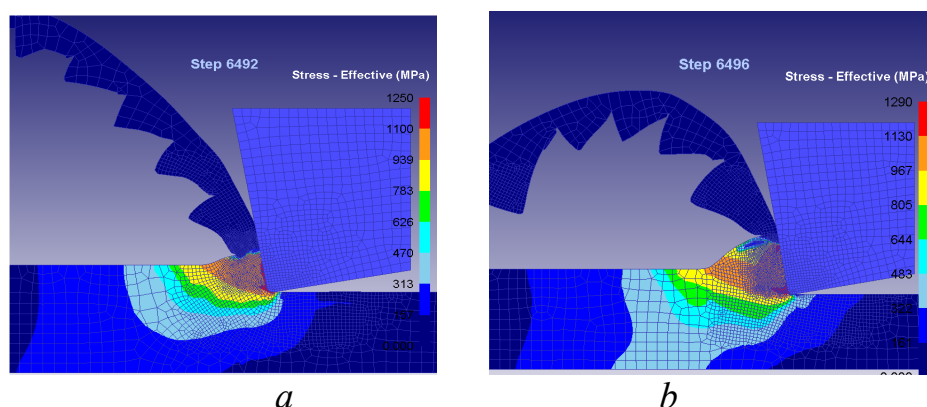
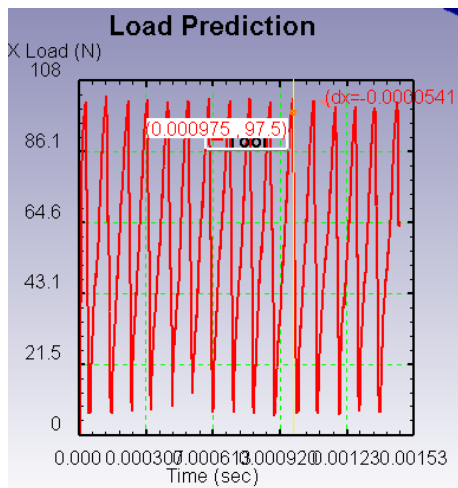
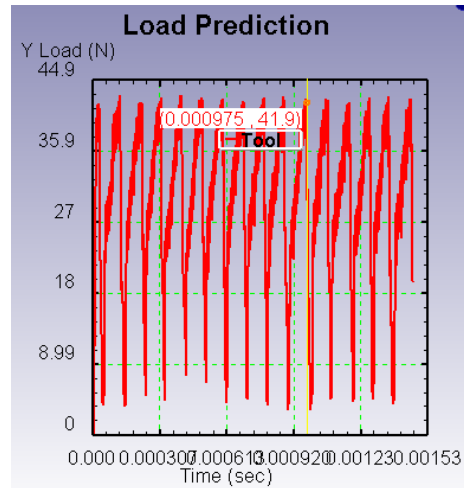


Рис. 1 – Напруження (за Мізесом) в зоні різання при коефіцієнті тертя  $f = 0,10$  (а) та  $f = 0,35$  (б)

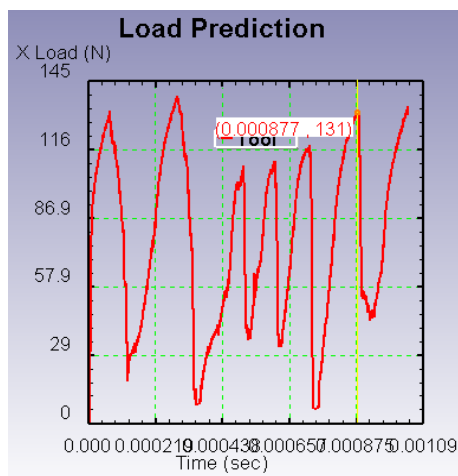
Зниження коефіцієнту тертя від значень 0,35 до 0,10 (модель матеріалу [4]) призводить до зниження розрахункових значень складових сил різання з  $P_z = 130$  Н,  $P_y = 66$  Н до  $P_z = 97$ Н,  $P_y = 42$ Н. Потрібно відзначити, що отримані значення сил різання обумовлені переважно складовими, які діють на передній поверхні інструменту, що пояснює значно нижчі, у порівнянні із значеннями сил, які спостерігаються експериментально, величини складових  $P_y$ . Діаграми розрахованих при моделюванні складових сили різання приведені на рис. 2.



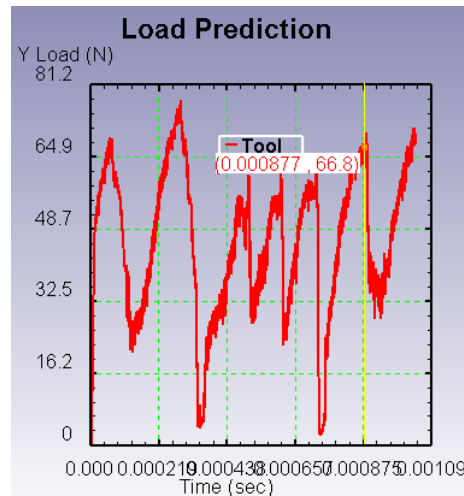
*a*



*б*



*в*



*г*

**Рис. 2 – Розраховані діаграми складових сил різання  $P_z$  (*a*, *в*) та  $P_y$  (*б*, *г*) при коефіцієнтах тертя  $f = 0,10$  (*a*, *б*) та  $f = 0,35$  (*в*, *г*)**

Характеристики контактної взаємодії та дані щодо складових сили різання приведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Розраховані характеристики контактної взаємодії та експериментальні дані щодо складових сили різання**

$f$	$P_z$ , Н (max)	$P_y$ , Н (max)	$L$ , мкм (max)	$a$ , мкм (max/min)
модель при 0,10	93	42	58	58/37
модель при 0,35	126	56–66	82	72/34
експериментальні дані	125	215	65	48/34

Оскільки контактна взаємодія на задній поверхні інструменту суттєво впливає на радіальну складову сили різання, а тангенційна складова при цьому переважно визначається деформацією оброблюваного матеріалу в зоні зсуву і тертям стружки по передній по-

верхні різця, величина  $P_z$  безпосередньо визначається величиною коефіцієнту тертя.

В першому наближенні, за умови близьких значень товщини зрізу та швидкості різання, тангенційна сила різання визначається наступної регресійної залежністю

$$P_z = 79,17 + 138,9f.$$

### Література

1. Manokhin, A. Modeling of the Machining Process by PCBN Tool with Self-adaptive Coating / A. Manokhin, S. Klymenko, M. Kopeikina, S. Klymenko, Y. Melniychuk // *Advanc. Manufact. Proc. II.* – Springer, 2021. – P. 545–554.

2. Klimenko, S. A. AlN-(TiCr)B<sub>2</sub> ion-plasma coating for cutting tools of cBN-based polycrystalline superhard material / S. A. Klimenko, I. A. Podchernjaeva, V. M. Beresnev et al. // *J. Superhard Mat.* – 2014. – 36. – P. 208–216.

3. Huang Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning / Y. Huang: PhD Dissertation. – Georgia In-te of Technol., Georgia, 2002.

4. Руководство по металлообработке – SANDVIK Coromant, 2009.

*Матвійчук О.О.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ МЕЗОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ТА РЕМОНТІ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЮВАЧІВ ДВИГУНІВ АВІАЦІЙНИХ АГРЕГАТІВ**

Композиційні матеріали на основі високомодульних сполук WC, TiC, SiC використовуються в зносостійких парах тертя ковзання в якості ущільнювачів.

Серед зазначених сполук саме карбід вольфраму WC має оптимальне поєднання модуля пружності та енергії активації руху дислокацій, що дозволяє створювати на його основі композити мікрогетерофазного типу таких як WC-Ni в якості торцевих ущільнювачів, що працюють в умовах обмеженого змащування рідинами, що перекачуються при великих швидкостях та знакозмінних наван-

таження. Дані композити складаються з частинок карбіду вольфраму розміром 2–3 мкм та зв'язуючої фази, як правило це нікель у кількості 20–30% об. Така композиція має помірну корозійну стійкість та добре себе зарекомендувала при перекачуванні мало'язких рідин таких, як вода, гас, бензин, та інш. Оскільки умови роботи таких ущільнювачів наближені до умов граничного тертя ( $\mu = 0,35-0,28$  [1]) – це призводять до нерівномірного нагрівання та охолодження, що спроваджується утворенням термічних мікротріщин. Також наявність знакозмінних навантажень призводить до утворення втомних мікротріщин, які перпендикулярні вектору швидкості на радіальній поверхні ущільнювача, і як наслідок це може призвести до його руйнування. Враховуючи вищезазначене зрозуміло, що властивості однорідних твердих сплавів для виготовлення пар тертя ковзання, що працюють в складних умовах наблизилися до своєї межі.

Як відомо, втомна міцність (працездатність) матеріалу типу WC-Ni визначається коефіцієнтом енергопоглинання та роботою деформації: чим вони більші тим сильніше матеріал може протидіяти зародженню та розповсюдженню мікротріщин. Одним зі способів збільшити роботи деформації є збільшення розмірів зерна та відповідно товщини прошарків зв'язуючого, в яких зародки мікротріщин будуть гаситися. Нашими дослідження було продемонстровано, що використання частинок WC з розміром зерна до 20 мкм дозволяє знизити коефіцієнт граничного тертя до 0,16 [2], а розрахунками залишкових термічних напружень [3] доведено що в мезоструктурних композиціях залишкові термічні напруження набагато нижчі саме в мезоструктурах порівняно з однорідними твердими сплавами.

Незважаючи на високу зносостійкість композитів типу WC-Ni їх висока питома вага, висока вартість вольфраму обмежують їх використання в якості ущільнювачів та пар тертя двигунів авіаційних агрегатів таких, як турбіни або насоси для перекачування палива. Як правило там використовують композити на основі карбіду кремнію, основним недоліком якого є низькі значення тріщиностійкості, та мала здатності протидіяти відцентровим силам, що може призводити до їх руйнування. При цьому в таких композитах складно створити мезоструктуру, яка б могла підвищити тріщиностійкість.

По моїм міркуванням для зниження ваги, підвищення зносостійкості та особливо корозійної та ерозійної стійкості підходять мезоструктурні композиції на основі складних карбідів ти-

тану, модуль пружності якого займає проміжне положення між WC та SiC. Так наприклад створення композиції на основі складного карбїду титану порівняно з WC дозволяє знизити питому вагу виробу залежно від вмісту зв'язучого металу від 10,5 до 9,4 г/см<sup>3</sup>. Тому перспективним металокерамічним матеріалом для ущільнювачів у даному випадку могли б бути мезокомпозиція на основі складного карбїду (Ti,W)C. Це пов'язано з тим, що властивості карбїду титану, що насичений вольфрамом до (Ti,W)C такі, як тріщиностійкість, твердість, модуль пружності будуть займати проміжне значення між WC та TiC, а широка область гомогенності TiC по вмісту вуглецю та вольфраму роблять ці властивості малозмінними від їх вмісту. Все це відкриває перспективу для використання даної композиції для виробництва торцевих ущільнювачів авіаційних двигунів.

### Література

1. Бондаренко, В.П. Триботехнические композиты с высокомо- дульными наполнителями / В.П. Бондаренко. – К. : Наук. думка, 1987. – 232 с.

2. Спосіб виготовлення самоструктурованного металокера- мічного матеріалу триботехнічного призначення / М.В. Новіков, В.П. Бондаренко, О.О. Матвійчук, О.В. Євдокимова // Патент Украї- на, МПК<sup>51</sup> C22C 29/08 № u2014 104670, Опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4.

3. Литошенко, Н.В. Залишкові термічні напруження у твердих сплавах з мезоструктурою / Н.В. Литошенко, О.О. Матвійчук // Фізико-хімічна механіка матеріалів. –2024.– Том 60, № 1. – С. 78–84.

*Матошин О.В., Вислоух С.П.* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ В КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

Протягом останніх десятиліть композиційні матеріали широко використовуються як заміник традиційних конструкційних металів і сплавів. Зокрема, композиційний матеріал, що армований вуглецевим волокном, лідирує в технологіях аерокосмічної, оборонної та автомобільної промисловості завдяки своїм механічним власти-



востям, таким як велике співвідношення міцності до маси, покращені показники втоми при експлуатації деталі, висока стійкість до корозії, пошкоджень та ударів.

Найбільш часто використовуваною операцією механічного оброблення композиційних матеріалів є свердління. Відомо, що цей процес, внаслідок особливостей структури цих матеріалів, пов'язаний із утворенням різних дефектів, які суттєво знижують якість отриманих отворів. До цих дефектів відносяться висока шорсткість обробленої поверхні, розшарування, сколи, усадка, пошкодження поверхневого шару, розмірна похибка, відхилення від круглості тощо [1].

Тому для отримання деталей із необхідними параметрами якості та точності поверхонь отворів використовуються різні способи оптимізації операцій їх оброблення. Дані підходи включають вибір інструмента відповідної геометрії та оптимізацію режимів різання.

З метою забезпечення необхідних параметрів якості свердління отворів в деталях з композиційних матеріалів доцільно визначити оптимальні режими їх оброблення. Розв'язання задачі оптимізації процесу різання вимагає розроблення його математичної моделі.

При розв'язанні задачі пошуку оптимальних режимів оброблення деталей із вуглепластику в якості критерію обрано максимальну продуктивність  $N$  даного процесу:

$$\max N = f(V, S, d, 2\varphi),$$

в області допустимих рішень, що визначена обмеженнями:

$$K_{розш} = f_1(V, S, d, 2\varphi) \leq K_{розш, \max}; \quad Ra = f_2(V, S, d, 2\varphi) \leq Ra_{\text{доп}};$$

$$P = f_3(V, S, d, 2\varphi) \leq P_{\text{крит}}; \quad \Delta = f_4(V, S, d, 2\varphi) \leq 0,5TD;$$

$$h = f_5(V, S, d, 2\varphi) \leq h_{\text{доп}}; \quad S_{\min} \leq S \leq S_{\max}; \quad n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

де  $V$  – швидкість різання, м/хв;  $S$  – подача, мм/хв;  $d$  – діаметр свердла, мм;  $2\varphi$  – кут при вершині свердла;  $K_{розш}$  – прогнозоване значення коефіцієнта розшарування;  $K_{розш, \max}$  – максимальне значення коефіцієнта розшарування;  $Ra$  – прогнозоване значення шорсткості поверхні обробленого отвору, мкм;  $Ra_{\text{доп}}$  – допустиме значення шорсткості поверхні обробленого отвору, мкм;  $P$  – вимірне значення осьової сили в процесі свердління, Н;  $P_{\text{крит}}$  – критичне значення осьової сили, що визначається за властивостями оброблюваного матеріалу, Н;  $\Delta$  – розмірна похибка свердління, мкм;  $TD$  – допуск за якітетом точності отвору, мкм;  $h$  – значення зносу різального інструмента, мкм;  $h_{\text{доп}}$  – допустиме значення зносу різального інструмента, мкм;  $S_{\min}$  та  $S_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення

ня подачі, що визначені можливостями використовуваного обладнання, мм/хв;  $n_{\min}$  та  $n_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення кількості обертів шпинделя оброблюваного верстата, об/хв.

Для реалізації поставленої мети проведено експериментальні дослідження процесу свердління отворів в деталях з вуглепластику [2]. За результатами експериментальних досліджень отримано математичні моделі осьової сили, коефіцієнта розшарування та шорсткості обробленої поверхні, що дозволяють виконувати їх оцінку та прогнозування в режимі реального часу за допомогою автоматизованої системи керування.

На основі створеної математичної моделі процесу розроблено програму «Optimization composites», яка дозволяє отримати початкові значення оптимальних режимів свердління, що забезпечують максимальну продуктивність з обмеженнями за параметрами якості поверхонь отворів.

Для дослідження процесу свердління отворів в деталях з вуглепластику запропоновано методику імітаційного моделювання з використанням автоматизованої системи керування. Для її реалізації розроблено програму «Drilling composites v1», що дозволяє виконувати симуляцію вимірювань сигналу осьової сили шляхом генерації її певних величин з діапазону експериментальних даних за значеннями кількості обертів шпинделя та кута при вершині свердла.

**Висновки.** Використання імітаційного моделювання процесу свердління отворів у деталях з вуглепластику за допомогою програми «Drilling composites v1» дозволяє швидко, без матеріальних витрат, при значному зниженні енергетичних та часових ресурсів виконувати симуляцію реального процесу з визначенням керуючих значень подачі та встановити оптимальні значення кута при вершині свердла, а також частоту опитування динамометра для вимірювання значень осьової сили в системі автоматизованого керування. При цьому аналіз процесу свердління можна здійснювати з критичними режимами та умовами оброблення.

Таким чином, пропонується виконувати дослідження процесу свердління полімерних композиційних матеріалів з використанням автоматизованої системи керування шляхом імітаційного моделювання, що підтримує встановлені оптимальні режими різання. При цьому рекомендується корегування параметрів процесу свердління виконувати шляхом відповідної зміни подачі різання.

## Література

1. Lupkin, B. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials / B. Lupkin, O. Andrieiev, K. Maiorova, V. Antonyuk, S. Vysloukh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – №3/1 (123). – P. 59–67.
2. Shahrajabian, H. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite / H. Shahrajabian, M. Farahnakian // Inter. J. of Precis. Eng. and Manufact. – 2013. – Vol. 14, №. 10. – P. 1829–1837.

*Мельник В.Є., Филь Р.С.* Державний науково-дослідний інститут МВС України  
*Студенець С.Ф.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

На кресленнях зубчастих коліс в правій частині є таблиця, в якій вказуються параметри зубчастого колеса, зокрема, ступінь точності з зазначенням нормативного документу відповідно до якого цю точність встановлюють. Ступінь точності за ГОСТ 1643-81 складається з трьох цифр (можуть співпадати), які незалежать одна від іншої, а також літери. Цифри вказують на норми: кінематичної точності, плавності роботи, контакту зубів коліс в передачі, а літера на вид сполучення зубчастих коліс в передачі.

В Україні для контролю точності циліндричних зубчастих коліс використовують три стандарти ГОСТ 1643-81, ДСТУ ISO 1328-1:2006 і ДСТУ ISO 1328-1:2006 або інші нормативні документи, які не були затверджені в нашій державі, наприклад DIN 3962 [1–4]. ГОСТ 1643-81 з 2019 року в Україні не діє, але завдяки простоті використання широко розповсюджений, хоч він і застарілий. Для контролю параметрів за ГОСТ 1643-81 використовують прості інструменти типу нормалемірів, які не потребують високої кваліфікації користувача. ДСТУ ISO 1328-1:2006 і ДСТУ ISO 1328-1:2006 пристосований до використання координатно-вимірювальних машин, які відповідно потребують навчання для користу-

вачів [5]. Особливою відмінністю ГОСТ і ДСТУ ISO 1328-1:2006 є те що в міжнародному стандарті не розглядається зубчаста передача лише елементи зубчастого колеса. В Україні при проектуванні і виготовленні, традиційно, розраховують обидва зубчастих колеса. Міжнародний стандарт має більш широке застосування, він не прив'язаний до вихідного контуру і враховує мілкомодульні зубчасті колеса, а також по деяких показниках доходить до модуля 70 і 10000 мм ділильного діаметру, але більш обмежений по ширині зубчастого вінця до 1000 мм. ГОСТ обмежений стандартним вихідним контуром по ГОСТ 13755-81, що обмежує його застосування, зокрема до іноземної техніки. Також ГОСТ не враховує мілкомодульні зубчасті передачі і колеса, обмежений модулем 55 і ділильним діаметром 6300 мм, але має більш широкий діапазон по ширині зубчатого вінця до 1250 мм. ДСТУ ISO є перекладеним стандартом з міжнародних стандартів ISO 1328-1:1995 і ISO 1328-2:1995, які є теж не нові. В ГОСТі передбачено 12 ступенів точності зубчастих коліс і передач з 1 по 12. В ДСТУ ISO 1328-1:1995 передбачено 13 ступенів точності, але рахунок веде від 0 до 12. По деяких показниках більш жорсткіші норми по ГОСТ, а по деяких по ДСТУ ISO 1328-1:1995, є і однакові значення.

Порівняємо сумарну похибку профілю для 6, 7 і 8 ступеню точності для шестерень гідронасосу модулем 2,625 мм, кількість зубців 12, ширина зубчастого вінця для різних типорозмірів змінюється від 9,7 мм до 38,3 мм, вихідний контур по ГОСТ 13755-81. За ГОСТ 16343-81: 6 ступінь –  $f_f = 8$  мкм, 7 ступінь  $f_f = 11$  мкм, 8 ступінь  $f_f = 14$  мкм. За ДСТУ ISO 1328-1:2006: 6 ступінь  $F_a = 10$  мкм,  $F_a = 14$  мкм,  $F_a = 20$  мкм. Більш високі вимоги за ГОСТ до точності можуть пояснюватись тим, що в ньому іде діапазон модуля від 1 до 3,5 мм, тоді як в ДСТУ ISO 1328-1:2006 є два діапазони модуля від 0,5 до 2 мм, і від 2 мм до 3,5 мм. В діапазоні модуля від 0,5 до 2 мм ДСТУ ISO 1328-1:2006, значення сумарної похибки профілю майже співпадають з ГОСТом, так 6 ступінь  $F_a = 7,5$  мкм,  $F_a = 10$  мкм,  $F_a = 15$  мкм.

Так, само порівняємо сумарну похибку кроку  $F_p$ . За ГОСТ 1643-81: 6 ступінь –  $F_p = 22$  мкм, 7 ступінь  $F_p = 32$  мкм, 8 ступінь  $F_p = 45$  мкм. За ДСТУ ISO 1328-1:2006: 6 ступінь  $F_a = 21$  мкм,  $F_a = 30$  мкм,  $F_a = 42$  мкм. Як видно по цьому параметру  $F_p$  значення по ГОСТ і ДСТУ майже співпадають.

Таким чином для середніх модулів циліндричних зубчастих коліс доцільно прискорити перехід на ДСТУ ISO 1328-1:2006, при тому що він відповідає ГОСТ 1643-81.

### **Література**

1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. 45 с.

2. ДСТУ ISO 1328-1:2006 Колеса зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 1. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень бічних поверхонь зубців зубчастого колеса (ISO 1328-1:1995, IDT). Чинний від 2007-10-01. ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2009. 29 с.

3. ДСТУ ISO 1328-2:2006 Колеса зубчасті циліндричні. Система точності ISO. Частина 2. Терміни та визначення понять і встановлені допуски відхилень радіальних складників і биття (ISO 1328-2:1997, IDT). Чинний від 2007-10-01 ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2009. 16 с.

4. DIN 3962. Tolerances For Cylindrical Gear Teeth. Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) 1978.

5. Калин, А. Н. Проблемы внедрения стандарта серии ISO 1328 в Украине / А. Н. Калин, Т. Г. Гацкалова, В. С. Купко. – Метрологія, 2012. – С. 443–450.

*Молчанов В.Ф., Латишев Д.В.* Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ**

У машинобудуванні забезпечення кінцевих параметрів деталей з якості і точності досягається на операціях шліфування. Аналіз кінцевих параметрів по точності обробки на круглошліфувальних верстатах показав наявність у шліфованих деталей відхилень від співвісної (ексцентриситету) і радіального биття, обумовлених такими причинами, як початкові похибки заготовок, похибки їх установки в пристосуванні, неточність верстата, технологічна спадковість [1, 2].

Зменшення радіального биття і ексцентриситету шляхом підвищення точності верстата, пристосування і зниження початкових

похибок заготовок не завжди дозволяє вирішити завдання стабільного досягнення необхідної точності обробки. Це обумовлено тим, що верстат і настановні елементи пристосування внаслідок їх зносу так чи інакше знижують свої характеристики точності. При використанні високоточного устаткування збільшуються і витрати на обробку. Такий шлях зменшення радіального биття і ексцентриситету шліфованих деталей, як підвищення жорсткості технологічної системи, не завжди ефективний. Це повинно бути обґрунтовано для конкретних умов обробки. Подібна оцінка може бути виконана на основі моделювання з використанням математичних моделей і запропонованого алгоритму для розрахунку параметрів точності деталей.

Метою дослідження є підвищення точності обробки деталей на круглошліфувальних верстатах, шляхом зниження їх радіального биття і ексцентриситету.

На рис. 1 графічно виражена закономірність знімання металу з оброблюваної поверхні, що має початкову похибку.

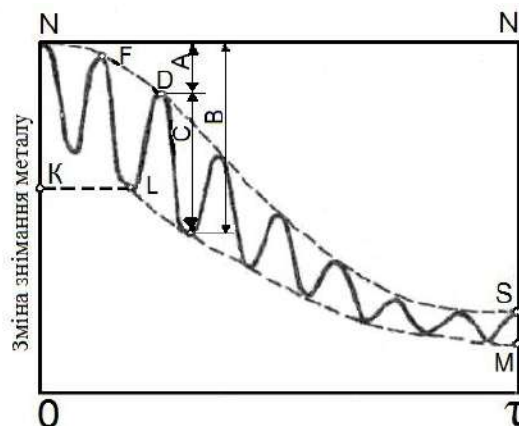


Рис. 1 – Зміна знімання металу і похибки заготовки в процесі шліфування

Якщо лінію NN представити лінією контакту при першому зіткненні з інструментом, то відрізок A і аналогічні йому виражають змінну величину знімання металу з боку максимального радіус-вектора, а відрізок B – знімання металу з боку мінімального радіус-вектора (криві FS і KLM відповідно). Відстань між цими лініями C є поточним значенням залишкової похибки  $\Delta r_i$ , яка може бути вирахована за формулою:

$$\Delta r_i = r_{\max i} - r_{\min i} \quad (1)$$

або

$$\Delta r_i = \Delta r_o - \left( \sum_{i=1}^n \Delta r_{\max i} - \sum_{i=1}^n \Delta r_{\min i} \right), \quad (2)$$

де  $\Delta r_0$  – початкове радіальне биття заготовки;  $\sum_{i=1}^n \Delta r_{\max i}$  – знімання металу з боку максимального радіус-векторів;  $\sum_{i=1}^n \Delta r_{\min i}$  – знімання металу з боку мінімального радіус-векторів.

Аналіз формули (2) вказує про те, що прискорити процес виправлення початкового ексцентриситету або радіального биття можна за рахунок збільшення знімання металу з боку максимального і зменшення з боку мінімального радіус-векторів заготовки. Для цього необхідно створювати при шліфуванні попереднє зміщення осі зовнішньої поверхні заготовки відносно осі обертання шпинделя передньої бабки.

При шліфуванні запропонованим способом перед початком обробки утворюють додаткове зміщення осі зовнішньої поверхні деталі відносно осі обертання шпинделя передньої бабки верстата на величину початкової похибки  $\Delta r_0$ . Шліфувати при цьому необхідно до моменту досягнення величини, рівній за величиною додатково створеному зміщенню осей.

Висновки. Аналіз і порівняння даних при запропонованому шліфуванні показує, що застосування розробленого способу досягнення точності обробки дозволяє прискорити процес виправлення похибок в 2–3 рази в порівнянні із звичайним шліфуванням. Для реалізації розробленого способу у виробничих умовах може бути рекомендоване або попереднє сортування заготовок по групах з однаковим початковим ексцентриситетом і наступна обробка з постійним додатковим зміщенням осей для кожної із груп, або оснащення верстата системою адаптивного керування.

## Література

1. Латишев, Д.В. Дослідження керування точністю обробки на шліфувальних верстатах / Д.В. Латишев, В.Ф. Молчанов // Зб. наук. праць Міжнарод. молодіж. наук.-техн. конф. – Краматорськ : ДДМА, 2023. – 319 с.
2. Молчанов, В.Ф. Підвищення точності обробки деталей на шліфувальних верстатах / В.Ф. Молчанов, Д.П. Часов, Д.В. Латишев // Тез доп. XIII Міжнарод. наук.-прак. конф. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – С. 184–186.

## **МОДЕРНІЗАЦІЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕХАНІЗОВАНОГО НАПИЛЕННЯ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ПОКРИТТІВ**

Одним із ефективних методів підвищення терміну служби деталей і обладнання є газополуменеве напилювання, яке дозволяє наносити покриття широкого призначення з металевих і неметалевих матеріалів з різноманітними властивостями. Але вітчизняна техніка та технологія для газополуменевого напилення покриттів має низку суттєвих недоліків: недостатню продуктивність, низький рівень механізації і автоматизації, обмежену кількість установок спеціалізованого і універсального призначення.

Ще наприкінці 80-х років минулого століття у лабораторії газотермічних покриттів і зварювання нинішнього Державного університету «Житомирська політехніка» було розроблено та виготовлено експериментально-дослідний зразок установки механізованого напилення покриттів мод. КНПА-1.

До складу установки входять: камера з приєднаною місцевою вентиляцією; передня і задня бабки в центрах яких закріплюють деталь, що напилюють; привод обертання деталі; супорт, на якому закріплюють апарат напилювання; привод переміщення супорта; пульт керування електроприводами.

Лабораторні випробування та застосування у виробничих умовах показали, що установка забезпечує якісне напилення газополуменевих покриттів різного призначення на деталі типу «вал». Але одночасно було виявлено і певні недоліки. Застосування редукторів у приводах не забезпечувало плавного регулювання швидкостей в широкому діапазоні, а саме: частоти обертання деталі і швидкості переміщення апарата напилення вздовж осі обертання деталі.

Після проведених на сьогодні випробувань виконано модернізацію установки КНПА-1. У процесі виконано низку досліджень із застосуванням приводу робочих органів без редукторів, що спростило конструкцію та обслуговування установки.

Для обертання напилюваної деталі застосовано тиристорний електропривод типу ET1E2-22 з електродвигуном постійного струму 2ПН-100 потужністю 1,1 кВт, а для переміщення супорта уста-



новки – тиристорний електропривод типу ET1E1-4 з електродвигуном постійного струму ПЛ-062 потужністю 120 Вт.

На пульті керування розміщено регулювальні резистори обертів шпинделя та швидкості переміщення супорта установки; прилади контролю обертів шпинделя та швидкості переміщення супорта установки; кнопкові станції пуску та зупинки електроприводів; сигнальні лампи працюючих приводів та напряму руху супорта установки. Крім того, на супорті установки встановлено шляхові вимикачі, що забезпечують зміну напряму руху супорта при виконанні багатошарового нанесення покриття.

На супорті установки встановлено пристрій для кріплення апаратів напилення покриттів, зокрема, таких, як ГАЛ-6, пістолетів-розпилювачів від установок Л5405А (українського виробництва), УГПТ-П, УГПТ та інших, газових металізаторів, електрометалізаторів тощо. В результаті виконаних робіт отримано вдосконалену установку мод. КНПА-1,2М, що забезпечує обертання деталі, переміщення напилювального пальника або металізатора вздовж деталі в широкому діапазоні швидкостей при огороженні зони напилювання. Технічні характеристики (табл. 1) установки забезпечують багатошарове нанесення покриттів у напівавтоматичному режимі.

**Таблиця 1 – Технічні характеристики установки КНПА-1,2М**

Найменування показника	Значення показника
Діаметр напилюваної деталі, мм	до 100
Довжина напилюваної деталі, мм	до 1200
Маса напилюваної деталі, мм	до 50
Частота обертання деталі:	
– мінімальна, об/хв	30
– максимальна, об/хв	1500
Швидкість переміщення напилювального апарата становки:	
– мінімальна, мм/хв	120
– максимальна, мм/хв	6000
Потужність споживання електроенергії, кВт	1,2
Напруга мережі, В	3×380
Габаритні розміри, мм	2000×1050×1500

Лабораторні випробування модернізованої установки КНПА-1,2М показали, що переміщення супорта з апаратом напилення із

заданою швидкістю забезпечує отримання напиленого покриття однакової товщини по всій поверхні деталі.

Установка використовується для нанесення багат шарових покриттів у напівавтоматичному режимі при проведенні наукових досліджень і навчальних занять.

*Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Базалій Г.А.,  
Косенчук Т.О.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ХІМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТА ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ**

Виготовлення сучасного абразивного інструменту потребує високоякісних, однорідних за фізико-механічними характеристиками порошків синтетичного алмазу, в першу чергу за характеристиками міцності. Властивості порошку синтетичного алмазу формуються в процесі синтезу, вилучення та сортування. Сортування здійснюють різними методами, наприклад, розділенням порошку в магнітному полі, або при флотаційному розділенні. Відомо, що попередня підготовка порошку до сортування із застосуванням хімічного, ультразвукового або імпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом порошків алмазу, дозволяє при сортуванні в магнітному полі або при флотаційному розділенні отримувати порошки більш однорідні за морфометричними характеристиками.

Мета даного дослідження полягає у вивченні формування характеристик міцності порошків синтетичного алмазу під впливом попереднього хімічного оброблення та флотаційного розділення на характеристики міцності порошків флотаційного розділення

Досліджували зразки порошку алмазу марки АС20 зернистістю 100/80, який синтезовано в системі Ni-Mn-C, продукти його хімічного оброблення та флотаційного розділення (пінний та камерний). Дослідження проводили в 2 етапи. На першому етапі вихідний зразок порошку алмазу піддавали флотаційному розділенню на пінний та камерний продукти. На другому етапі вихідний зразок порошку алмазу піддавали попередньому хімічному обробленню в рідині із застосуванням окислювачів при нагріві з подальшим обробленням у дисти-

льованій воді та сушінням. Далі отриманий порошок піддавали флотаційному розділенню на пінний та камерний продукти. Отримані зразки продуктів розділення піддавали хімічному очищенню від флотореагентів, сушінню та дослідженню характеристик міцності.

Визначали показники міцності порошку за паспортом випробування на міцність проби порошку однієї зернистості при статичному стисканні згідно характеристик марок та проводили диференційний та інтегральний аналіз складу порошку за міцністю. Визначали показник однорідності порошку за міцністю, який оцінювали за вмістом зерен номінальної марки.

Для опрацювання результатів дослідження застосовували сучасні методи математичної статистики.

Отримані результати показали, що застосування флотаційного розділення, а також флотаційного розділення з попереднім хімічним обробленням порошку призводить до покращення характеристик міцності за рахунок збільшення контрастності властивостей, які сприяють флотаційному розділенню алмазного порошку.

З даних табл. 1 видно, що підвищуються значення середнього показника міцності вихідного та пінного продукту, значення показника однорідності за міцністю за номінальною маркою, що найбільшою мірою відображається на показниках пінного продукту.

**Таблиця 1 – Результати дослідження та лінійної апроксимації кривих інтегрального аналізу складу зразків порошку за міцністю першого та другого етапів флотаційного розділення**

Показники порошку марки АС20 зернистістю 100/80			Показники лінійної апроксимації кривих інтегрального аналізу складу порошку за міцністю			
Матеріал дослідження	Середнє значення міцності, $H$	Показник однорідності за міцністю за номінальною маркою, %	Коефіцієнти рівняння $y = ax + b$		Інтервал значень міцності $H$	Достовірність апроксимації, $R^2$
			$a$	$b$		
<b>Перший етап</b>						
вихідний	17,4	16	10,73	-0,80	1,8–58,0	0,982
пінний	16,1	20	12,29	-10,0	1,8–58,0	0,958
камерний	12,5	14	10,33	+8,4	1,8–58,0	0,936
<b>Другий етап</b>						
вихідний	17,9	18	11,20	+2,40	1,8–46,0	0,930
пінний	17,4	30	12,45	-6,87	1,8–46,0	0,909
камерний	12,3	12	9,32	+22,27	1,8–46,0	0,867

Диференційний та інтегральний аналіз складу порошку за міцністю та результати лінійної апроксимації кривих інтегрального аналізу складу порошку за міцністю показав, що рівняння апроксимації кривих складу дозволяють встановити кількість порошку у заданому інтервалі міцності із забезпеченням достовірності в інтервалі 0,867–0,982. Коефіцієнт «а» відображає ступінь нахилу кривої, тобто чим більше коефіцієнт, тим більше кут нахилу прямої апроксимації, що свідчить про більшу однорідність порошку за міцністю. Тобто пінний продукт більш однорідний ніж вихідний порошок, чи камерний продукт, що корелюється з показником однорідності за міцністю за номінальною маркою.

*Охріменко О.А., Шуплецов Д.К.* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*Рябченко С.В.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ  
*Шелковий О.М., Лук'яниця Я.Ю., Клочко Л.В.* Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
*Гудименко О.М.* ТОВ "Комбінат Хлібопечення Кулиничі", Харків, Україна

## **РЕМОНТНОПРИГОДНІСТЬ РЕДУКТОРІВ В ХЛІБОПЕКАРНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Як що при ремонті редукторів виникає потреба замінити колеса зубчасті, то їх треба не просто замінити на такі самі на нові, але на нові з некрратним зубатим передаточним числом. За рахунок кутової корекції проектуються та виготовляються зубчасті колеса на тих же робочих вісях.

Недоліком існуючих циліндричних і конічних зубчастих передач є відсутність повного взаємного контактування всіх зубів один з одним. У процесі приробітку та експлуатації всі похибки, відхилення зуба шестірні виявлятимуться при контактуванні з похибками та відхиленнями зі сполучним зубом колеса. Виникає циклічна складова динамічного навантаження як наслідок: підвищений шум, вібрації. З метою зниження негативних факторів необхідно

підвищувати ступінь точності циліндричних зубчастих передач, що значно збільшує витрати на їх виготовлення і не знімає повністю питання зниження шуму, вібрацій, плавності зачеплення. В результаті дослідження експлуатаційних характеристик зубчастих зачеплень запропоновано методику розрахунку підвищення зносостійкості, довговічності та підвищення плавності роботи за рахунок створення та прогнозування певних передавальних чисел, які визначають некратність зачеплення і забезпечують роботу зубців ведучого зубчастого колеса з усіма зубами. -ліси. Для зменшення утворення мікропітнігу, необхідно використовувати зубчасті пари з некратним передатним ставленням, що забезпечуватиме участь всіх зубів у роботі і, як наслідок, рівномірне зношування, а також вибрати мастильний матеріал, призначений для запобігання мікропіттингу. Некратність зубчастого зачеплення характеризується контактуванням кожного зуба шестерні з кожним зубом зачеплюваного зубчастого колеса в певній послідовності і забезпечує прискорену рівномірну прироблюваність зубчастих коліс, що сполучаються, виправлення дефектів при виготовленні і зборки зубчастих передач, зменшення вібрацій, шуму, довговічність. Недоліком існуючого зубчастого зачеплення є те, що кожен зуб шестерні входить в контакт або контактує тільки з одним і тим самим зубом колеса або з групою одних і тих же зубів зубчастого колеса, що зачепляється в певній послідовності. Наприклад: зубчаста передача з  $i = 1,0$ , число зубів  $z_{1,2} = 20/20$ , кожен зуб шестерні контактуватиме тільки з одним зубом колеса.

У процесі приробітку та експлуатації всі похибки, відхилення зуба шестерні будуть проявлятися при контактуванні з похибками і відхиленнями зі сполучним зубом колеса [1–3]. Виникає циклічна складова динамічного навантаження і як наслідок: підвищений шум, вібрації.

З метою зниження негативних факторів необхідно підвищувати ступінь точності циліндричних зубчастих передач, що значно збільшує витрати на їх виготовлення і не знімає повністю питання зниження шуму, вібрацій, плавності зачеплення.

За допомогою вивчення основних геометричних і кінематичних параметрів швидкісних і високоточних зубчастих передач встановлено, що зубчасті колеса піддаються нерівномірному зношуванню, внаслідок чого мають низьку плавність та довговічність.

При великих швидкостях ковзання можливість заїдання визначається співвідношенням часу, необхідного для взаємодії мастиль-

ного середовища з мікроділянками чистого металу, і середнього часу проходження мікроучастків, одночасно оголюваних на поверхні тертя, між послідовними актами їх контактування з мікроділянками сполученої поверхні [3]. Тому перевищення критичних для конкретного випадку важконавантаженого контакту значень навантаження, швидкості або температури завжди викликає неприпустимо інтенсивне зношування і заїдання через відсутність рівномірного зносу. Руйнування зубчастих коліс найчастіше відбуваються у зв'язку з нерівномірним зношуванням зубів внаслідок застосування стандартних передавальних відносин. Для забезпечення довговічності, підвищення зносостійкості та підвищення плавності роботи зубчастих коліс необхідно створити такі умови їх контактування, при яких кожен зуб ведучого колеса в процесі роботи входив би в зачеплення з кожним зубом веденого колеса у певній послідовності.

### **Література**

1. Ковальов, В.Д. Наукові основи підвищення ефективності виробництва крупногабаритних редукторів / В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, О.І. Волошин, О.О. Клочко, С.В. Рябченко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : мат. Международ. науч.-практ. конф., 20–22 сентября 2017, г. Харьков. – Одеса : ОНПУ, 2017. – С. 59–61.
2. Охріменко, О.А. Застосування EDM технологій при виробництві зуборізних довбачів / О.А. Охріменко, О.А. Клочко, Д.К. Шуплецов, Т.М. Скрипник // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС –2022) : тез доп. XII Міжнарод. наук.-практ. конф., 26–27 травня 2022 р., м. Чернігів. У 2 т. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. – С. 35–36.
3. Шелковий, О.И. Підвищення ефективності експлуатації циліндричних і конічних зубчатих передач / О.И. Шелковий, О. О. Клочко, Є.О. Пермьяков, В.С. Федоренко, О.А. Охріменко, Д. К. Шуплецов, В.В. Хорошайло, В.В. Іванченко // Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні: мат. Міжнарод. наук.-техн. конф. – Одеса : ДУ «Одеська політехніка», 2022. – С. 182–183.

## **ДОВЕДЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ В СУЧАСНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

В сучасних умовах при випуску продукції і передачі її замовнику виробник часто стикається з проблемою підтвердження її відповідності. Тобто це насамперед якісний готовий продукт з підтверджуючими документами (декларація відповідності, сертифікат, атестат випробувань тощо).

На перший погляд, проблеми не повинно виникати, але... Це і окремі галузі виробництва з додатковими вимогами до продуктів та процесів, і специфічні вимоги клієнта і контракту, і сфера використання з особливими умовами та багато іншого.

Найпростіший шлях це декларування відповідності (стандартам, кресленням, технічним вимогам, умовам контракту тощо) і тут майже не виникає труднощів, якщо ці документи, вимоги і умови чітко зазначені. Так само з результатами випробувань – достатньо обрати відповідну акредитовану лабораторію чи організацію і отримати їх заключення.

Складніша ситуація, коли необхідний сертифікат, тобто організація, ще до початку робіт повинна бути акредитована на відповідний вид діяльності, щоб цей сертифікат надати.

Але, як показує досвід, найбільше труднощів виникає при доведенні відповідності продукту для окремих галузей діяльності, наприклад, залізничний транспорт, авіаційна техніка, видобувна сфера (шахти, офшори), військова техніка та інше. В чому ж полягає проблема. Головна відмінність це додаткові законодавчі вимоги, специфічні стандарти, вимоги безпеки тощо. Крім того, в кожній з цих сфер діяльності є свої уповноважені наглядові установи та організації, а також випробувальні лабораторії. Значних проблем додає недостатня гармонізація в цих сферах, тобто дуже вимог пов'язаних з безпекою жорстко зарегламентовані прямо чи опосередковано, через посилення на нормативні документи. Коли нормативні документи загального використання переглядаються і набирає чинності нова версія, в галузеві документи не завжди швидко вносяться відповідні зміни. Найбільш складна в цьому випадку ситуація з виробами, що вже давно розроблені і їх необхідно відремонтувати: з однієї сторони, вся документація вже давно роз-

роблена і виріб експлуатується, з іншої – при його виготовленні в сучасних умовах можуть діяти вже нові правила зі значними відмінностями, додержання яких вимагає внесення змін в «стару» документацію, що досить складно і не завжди є можливим. До того ж це не завжди доцільно з огляду на затрати часу та засобів.

Шляхів вирішення в такій ситуації декілька: оформлення одноразового дозволу на відхилення у відповідному уповноваженому органі (якщо робота разова чи обмежений час виконання контракту); виконання робіт під наглядом, проведення додаткових випробувань. В кожному конкретному випадку виникають свої обмеження, тобто однозначної відповіді немає.

*Пермяков О.А, Ткаченко Т.Ю. Яковенко І.Е.*

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
Харків, Україна

## **РАЦІОНАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ ІНЖИНІРИНГУ В УМОВАХ ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

В умовах високого темпу розвитку виробництва машинобудівної продукції, яка за своєю якістю повинна повністю задовольняти вимоги споживача і повинна виводитися на ринок у найкоротші терміни, велику роль відіграє технологічна гнучкість виробництва та можливість його швидкого переоснащення на випуск нових виробів. В умовах сьогодення виробництва не в повному обсязі використовують можливості сучасних верстатів з ЧПК із точки зору забезпечення ефективності дрібносерійного виробництва, оскільки не мають чіткої картини завантаження верстатів, яка дала б змогу побачити техніко-економічний ефект від їх використання. При цьому виникає організаційно-технологічне протиріччя між структурою гнучкої виробничої системи, яка характеризується кількістю і якістю використовуваного технологічного обладнання, та прогнозованістю ступеню його завантаження, без якої неможливо виконувати нормування технологічних операцій та розрахунки витрат в умовах дрібносерійного виробництва. Для вирішення цього протиріччя технологічна підготовка дрібносерійного виробництва повинна стоя-



ти на першому місці, а питання прогнозування та визначення раціонального завантаження верстатів з ЧПК мати теоретичне та практичне обґрунтування.

На сьогодні у реноваційних галузях найрозвиненіших країн світу задіяне близько 30% технологічного обладнання та робочої сили. Такий обсяг залучених ресурсів в машинобудуванні пов'язаний з тим, що відновлення зношених деталей залишається дуже важливим резервом підвищення ефективності використання техніки, економії матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів.

Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає альтернативу існуючим процесам відновлення деталей. Можливість створення 3D-моделей виробів методами ручного комп'ютерного графічного дизайну або за рахунок 3D-сканування, їх подальший експорт до САМ систем та використання методів традиційного субтрактивного виробництва (на основі верстатів з ЧПК) або методів адитивного виробництва (3D-друк) значно спрощує процес технологічного проектування та виготовлення деталей.

Одним із напрямів забезпечення одиничного та дрібносерійного виробництв є реверсивний інжиніринг. Реверсивний інжиніринг (реверс інжиніринг, зворотне проектування, reverse-engineering) – процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком. Зворотне проектування деталей потрібне, коли необхідне: відновлення втрачених деталей; відновлення зношених або деталей, що вийшли з ладу; збереження інформації про об'єкти для їхнього подальшого ремонту чи відтворення. Реверс-інжиніринг прискорює та спрощує виробничі процеси.

При проектуванні технологічного процесу визначальними чинниками є тип деталі та величина виробничої партії деталей. У разі невеликої кількості деталей у виробничих партіях (дрібносерійне виробництво) технологічний процес зазвичай реалізується на універсальних верстах з використанням універсальної технологічної оснастки. Технологічний процес найчастіше розробляють укрупнено. Деталізація операцій виконується при використанні верстатів із ЧПК у зв'язку з необхідністю підготовки керуючих програм. В такому випадку вважається, що використання верстатів з ЧПК іноді стає не ефективним в порівнянні з універсальними верстатами без ЧПК, оскільки перші значно дорожче других. Очевидно необхідно виявити переваги сучасних верстатів з ЧПК із точки зору забезпечення ефективності дрібносерійного виробництва. Для цього необхідно розглянути дану проблему з декількох сторін. По перше, при

проектуванні процесу виготовлення деталей максимально використувати метод реверсивного інжинірингу, що дасть змогу економити час при розробці та суттєво скоротити час технологічної підготовки виробництва за рахунок використання методів імітаційного моделювання. По друге, використати метод групової технології та групування деталей по технологічності конструкції. При написанні керуючих програм для верстатів з ЧПК врахувати технологічність деталей та об'єднати програми для кількох деталей або груп. По третє, при групуванні деталей по технологічності врахувати графіки випуску продукції та врахувати актуальність деталі в конкретний момент часу виконання виробничого завдання.

### **Література**

1. Пермяков, О.А. Методологія технологічного проектування процесу відновлення деталей / О.А. Пермяков, М.І. Черновол, Я.Б. Немировський, І.В. Шепеленко, В. І. Горбулик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 2 (8). – С. 61–68.
2. Карпусь, В.Є. Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія / В.Є. Карпусь, О.В. Котляр, В.О. Іванов.; за ред. В.Є. Карпуся. – Харків : НТМТ, 2012. – 296 с.
3. Пермяков, О.А. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій / О.А. Пермяков, І.Е. Яковенко, В.А. Калініченко, О.С. Скиба, П. Южкович // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків:НТУ «ХПІ», 2023. – № 2 (8). – С. 84–92.

*Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К.* Національний транспортний університет, Київ  
*Будяк Р.В.* Калинівський технологічний фаховий коледж, Калинівка, Вінницька обл., Україна

## **ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ГІЛЬЗ**

Для передачі руху робочого органу в багатьох видах техніки є системи, до яких входять гідро- чи пневмоциліндри. Найскладнішими з позицій технологій виготовлення або відновлення останніх

є гільзи. Оскільки матеріалом гільз, служать, як правило, мало- та середньовуглецеві сталі, що відзначаються, крім іншого, високою пластичністю. Найбільш продуктивними технологіями виготовлення і відновлення цих деталей є методи холодного пластичного деформування (ХПД), серед яких є протягування (деформуюче, різальне та комбіноване), а також розкочування кульковим або роликковим інструментом. У більшості випадків заготовками для гільз служать цільні гарячекатані та холоднокатані труби, точність отворів яких є незадовільною з позицій виробів машинобудування. Крім того гільзи характеризуються глибоким отвором ( $l/d > 10$ ), що також створює проблеми з точністю поверхні останнього.

Прикладами застосування гідроциліндрів у машинах можуть служити: силові гідроциліндри головних рухів протяжних і поперечно-стругальних та інших верстатів, ґрунтообробної техніки у сільськогосподарському; силові та маніпуляційні гідроциліндри екскаваторів та іншої будівельної чи комунальної техніки; в авіаційній техніці усі операції, що пов'язані з роботою елеронів та закрилків, а також складових шасі, виконуються гідроциліндрами.

Пневмоциліндри використовують тоді, коли немає можливості у машині застосувати гідропривід. Наприклад, у крилатих керованих ракетах, де джерелом енергії служить стиснуте повітря, яке у спеціальних балонах несе на собі ракета, усі операції управління крилами та елеронами виконують пневмоциліндри. Тобто, у цьому випадку також є гільза, що має глибокий отвір.

Перспективним для операцій ХПД є також мінометні труби та танкові дула. Що стосується гільз циліндрів сучасних ДВЗ, то протягування та розкочування тут має свої особливості, які у першу чергу, пов'язані з малими деформаціями.

Для дослідження нами були обрані наступні марки сталей, виходячи із таких міркувань. *Сталь 10* має високі показники пластичності, тому погано обробляється різанням на низьких швидкостях. Добре піддається обробці холодною деформацією. Є добрим об'єктом для металографічних досліджень оптичною та електронною мікроскопією, а також графоаналітичних досліджень текстури. *Сталь 10ГН* легована марганцем і нікелем. Перший з них є карбидоутворюючим елементом, а другий не утворює карбідів, тому у сталі перебуває розчиненим у фериті. Обидва з них знижують критичну точку  $A_3$ , що сприяє відпалу при досягненні максимальних значень зміцнення або при перенаклепі. У всьому іншому ця сталь подібна до сталі 10. *Сталь 20Г В* стані поставки має структуру

«ферит-перліт». Легована марганцем ( $Mn = 0,7-1,0\%$ ) і, частково, кремнієм ( $Si = 0,17 = 0,37\%$ ), що, як і в усіх випадках використання цих елементів, поліпшує якість зварних швів, оскільки марганець і кремній є більш активним до шкідливого кисню, ніж залізо. Для гільз гідроциліндрів це важливо, тому що при їх виготовленні застосовується зварювання плавленням. Слід зауважити, що сталі названих вище марок добре сприймають, крім ХПД, сучасний вид хіміко-термічної обробки – безводне азотування у тліючому розряді, що, як правило, не потребує наступної фінішної обробки різанням. *Сталь 35* після повного відпалу ( $T = 830-850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) має структуру «ферит-перліт», має у своєму складі: 0,32–0,40% вуглецю; 0,17–0,37% кремнію і 0,50–0,80% марганцю, що сприяє зварюваності. Належать до класу сталей, що поліпшуються. Є основною для виготовлення гільз гідроциліндрів, оскільки добре сприймає операції ХПД, зокрема, деформує протягування і розкочування. *Сталь 40X* використовується з відповідними операціями термічної обробки (гартування, відпускання та ін.) для виготовлення деталей підвищеної міцності. Має у своєму складі: 0,36–0,44% вуглецю і 0,8–1,1% хрому, а також інші елементи відповідно до стандарту. Ця сталь, на відміну від сталей розглянутих вище марок, задовільно обробляється на низьких швидкостях різанням, значно гірше сприймає ХПД. Грає роль контрольної як типовий представник середньовуглецевих низьколегованих конструкційних сталей.

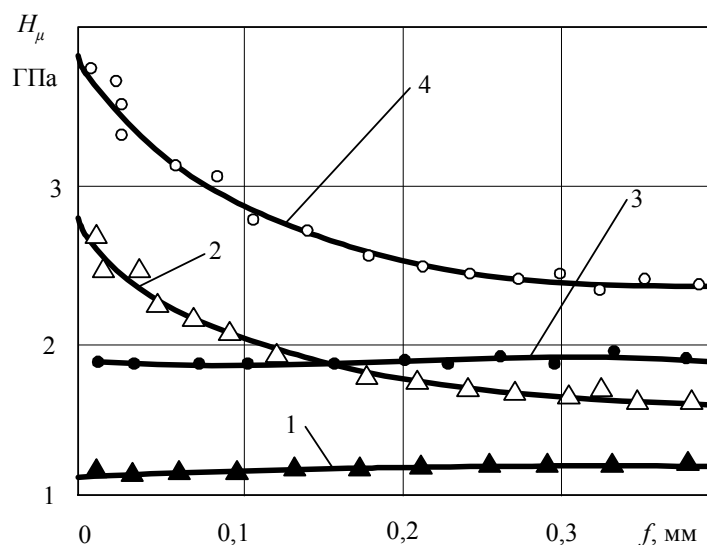
У всіх випадках використовувалось наскрізне деформує протягування (ДП), яке, супроводжується обов'язковою ХПД розтягу стінки зразка. Ступінь деформації контролювався замірами твердості.

Що стосується деформує протягування, то цей процес нас цікавить з двох позицій. З одного боку, ця технологічна операція при її проведенні на трубчастих деталях кінцевої товщини зі значними деформаціями зміцнює наскрізь стінку виробу. Це відбувається тому, що деталь отримує наскрізну деформацію розтягу. Крім цієї обов'язкової деформації, поверхневий шар виробу на глибину до кількох десятків часток міліметра піддається деформації зсуву. Таким чином, ДП є потужним засобом холодного деформаційного зміцнення (ХДЗ) деталі, що можна використати для обробки різанням при протягуванні. З іншого боку, ДП є джерелом хвилі позако-тактної деформації (ХПЗД), яка супроводжує кожний деформуєчий елемент інструменту в динаміці. Це, безумовно, також впливає на зуб різальної частини протяжки, якщо його розмістити в межах дії або поблизу ХПЗД.

На рис. 1 подано, як приклад, дані експериментів по вивченню зміцнення поверхні та серцевини трубчатих деталей, виготовлених із сталі 10 та сталі 35. В останньому випадку були використані зразки частини гільз гідроциліндрів, що виготовляються у виробництві. Відношення товщини  $t_0$  стінки до діаметра  $d_0$  склало  $t_0/d_0 = 0,15$ .

Із поданих на рисунку даних витікає наступне. Деформуюче протягування зміцнює серцевину деталі зі сталі 10 на 45% (початкова твердість  $H_\mu = 1,1$  ГПа) і сталі 35 на 30% (початкова твердість  $H_\mu = 1,9$  ГПа).

Що стосується сталей 10ГН і 20Г, то це перевищення сягає відповідно 39 і 36%. Товщина поверхневого шару, зміцненого додатковою деформацією зсуву, у всіх випадках сягає 0,2 мм. У цьому шарі виникає текстура, особливо у деталях із сталей, де домінує феритна складова. Мікротвердість поверхні отворів після ДП сталей 10, 10ГН, 20Г і 35 збільшувалась відповідно на 130; 115; 99 і 90 %. У першому і останньому випадках відповідно до  $H_\mu = 2,8$  ГПа і  $H_\mu = 3,85$  ГПа.



**Рис. 1** – Залежність мікротвердості  $H_\mu$  від товщини  $t$  стінки трубчастої деталі при протягуванні сталі 10 (2) і сталі 35 (4):  $v = 0,15$  м/с;  $a = 0,15$  мм; деформуючий елемент – твердий сплав ВК15М із забірним конусом  $\alpha_3 = 4^\circ$ ; МОР – сульфозфрезол. Криві 1 і 3 – сталі 10 і 35 відповідно у незміцненому стані

Таким чином, ДП одним деформуючим елементом, що працює з натягом на сторону 0,15 мм, можна ефективно використати для холодного зміцнення оброблюваного матеріалу перед секцією з 2–3 зубців.

Ще одним фактором, яким характеризується ДП є хвиля поза-контактної деформації, що супроводжує кожен деформуючий еле-

мент при обробці деталей з кінцевою товщиною стінки. А саме такими є порожнисті трубчасті деталі типу гільз гідроциліндрів з глибокими отворами. Для цих виробів характерним є відношення товщини  $t_0$  стінки заготовки до діаметра  $d_0$  отвору  $t_0/d_0 = 0,1-0,15$ . Приблизно це співвідношення спостерігається і для готової деталі, якщо основним процесом обробки отвору є протягування.

Приведені вище результати досліджень слугують вихідними даними для розробки комбінованих деформуюче-різальних протяжок та процесу обробки отворів гільз гідроциліндрів за схемою «комбіноване протягування – розкочування».

Виробничі дослідження нового технологічного процесу, побудованого за схемою обробки отвору гільзи «комбіноване протягування – розкочування» та заснованого на використанні інструменту нової конструкції, показали на машинобудівних підприємствах ефективність нової технології у першу чергу за рахунок підвищення КВМ до 0,90–0,92. Випробування сільськогосподарської техніки, яку було оснащено дослідними зразками гідроциліндрів з гільзами нового зразка, показало підвищення їх надійності, яке полягає, в першу чергу, у відсутності витікання робочої рідини.

*Радкевич С.І.* Державний університет  
«Житомирська політехніка», Житомир, Україна

## **ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАВУНІВ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ**

В умовах високої конкуренції на світовому ринку автомобілебудування, оборонної промисловості, суднобудування, верстатобудування, зростає попит на економічні конструкційні матеріали, з набором необхідних фізико-механічних характеристик та хорошої оброблюваності їх. При цьому велика увага приділяється зменшенню ваги кінцевого виробу та його придатності до вторинної переробки.

Одними з лідерів серед них є чавуни, які при їх низькій вартості володіють високими фізико-механічними характеристиками. У 2022 р. обсяг світового ринку чавунного лиття становив \$103,1 млрд, і, за прогнозами аналітиків, він зростатиме генеруючи дохід у розмірі \$193,2 млрд до 2032 р. Існує широкий вибір чавунів, з різним вмістом та формою вуглецю в них та відмінною металевою

структурою. Проміжне місце поміж ними займає високоміцний чавун з вермикулярним графітом ЧВГ. Вміст Mg (0,010–0,020%) в ньому забезпечує формування включень вермикулярної форми, та формування коралоподібної структури, які в значній мірі визначають їх високі характеристики міцності та теплофізичні властивості. Поряд з цим, здатність гасити вібрації роблять ЧВГ одними з найперспективніших конструкційних матеріалів для виготовлення литих деталей потужних двигунів і великогабаритної металургійної оснастки, які працюють в умовах високих температур та значних термоциклічних і механічних навантажень. Довгий час, по тому як ЧВГ був вперше випадково винайдений, було важко досягнути широкого його застосування, через складність отримання. Однак протягом останніх десятиліть технологія виготовлення ЧВГ покращувалась, і він став доступнішим як конструкційний матеріал. Світовим лідером у розробці технології стабільного виготовлення виливків з ЧВГ в глобальних масштабах стала фірма Sinter Cast (Швеція). Їх технологія нині застосовується у 13 країнах світу. В більшості, на сьогодні, технологія Sinter Cast переважно застосовується для виготовлення блоків циліндрів бензинових та дизельних двигунів, гальмівних дисків та деталей вихлопних систем для транспортних засобів. Проте поряд з ними з ЧВГ виготовляються станини, кронштейни та муфти, подушки, корпуси насосів та гідравлічні компоненти. У відповідності з міжнародним стандартом ISO 16112 чавун з вермикулярним графітом (“Compacted (Vermicular) Graphite Cast Iron”) передбачається п'ять марок: ISO 16112/JV/300 (феритний); ISO 16112/JV/350; ISO 16112/JV/400; ISO 16112/JV/450 (перлітний); ISO 16112/JV/500 (легований). Дана група чавунів, не зважаючи на великий інтерес до них з боку автомобілебудування, ще не має широкого використання їх в інших галузях промисловості, через низьку їх оброблюваність. Пошуку способів підвищення ефективності оброблюваності ЧВГ нині приділяється багато уваги з боку зарубіжних та вітчизняних вчених.

Плануємо дослідити оброблюваність ЧВГ різальним інструментом з використанням різних інструментальних матеріалів та режимів різання, для пошуку ефективно способу їх обробки.

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРІВ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ**

У сучасному світі, де точність вимірювальних інструментів відіграє ключову роль у багатьох аспектах життя, важливо розуміти та враховувати різні чинники, які можуть впливати на достовірність отриманих результатів під час калібрування інструменту.

Вимірювальні інструменти використовуються у наукових дослідженнях, виробництві, медицині та інших галузях, і точність цих вимірювань може вплинути на прийняття важливих рішень. Тому сучасне виробництво потребує максимально точного, надійного та якісного вимірювального інструменту. Забезпечення відповідності таким вимогам досягається завдяки калібруванню інструменту. Але в процесі калібрування з'являються чинники, які впливають на достовірність отриманих результатів.

Калібрування інструментів є критично важливим етапом для забезпечення точності та надійності вимірів

При підготовці та проведенні високоточних вимірювань в метрології враховується вплив: об'єкта вимірювань; суб'єкта вимірювань; способу вимірювання; засобів вимірювальної техніки; умов вимірювання.

Враховуючи джерела, які впливають на точність вимірів, були визначені чинники для підвищення точності вимірювань під час калібрування інструменту:

1. Використання високоякісних вимірювальних стандартів: один з ключових чинників, що впливають на точність калібрування, – це якість вимірювальних стандартів. Важливо використовувати стандарти високої точності і надійності, які мають відповідний ступінь метрологічної сертифікації.

2. Правильне налаштування обладнання: перед початком процесу калібрування слід перевірити і налаштувати вимірювальне обладнання на належні параметри. Це включає перевірку та коригування будь-яких системних зміщень або помилок, що можуть впливати на результати вимірювань.

3. Систематична перевірка та калібрування обладнання: регулярна перевірка та калібрування власного вимірювального облад-



нання є ключовими для забезпечення точності вимірювань. Це дозволяє вчасно виявляти і усувати будь-які відхилення від заданих параметрів.

4. Контроль умов навколишнього середовища: умови навколишнього середовища, такі як температура, вологість та тиск, можуть впливати на результати калібрування. Важливо забезпечити стабільні умови середовища під час вимірювань або враховувати ці фактори при аналізі результатів.

5. Проведення множинних вимірів: для зменшення випадкових помилок і підвищення точності рекомендується проводити множинні виміри. Це дозволяє виявити і усунути відхилення та встановити середнє значення вимірювання.

6. Навчання та підготовка персоналу: персонал, який здійснює процедуру калібрування, повинен мати відповідні знання і навички. Навчання щодо правильної методики калібрування та виявлення можливих помилок є важливою складовою процесу.

7. Використання документованої методики: важливо мати документовану методику калібрування, яка включає в себе кроки, процедури та критерії прийняття рішень. Це допомагає забезпечити систематичний підхід та однаковість у виконанні процедур калібрування.

8. Контроль якості процедури калібрування: важливо мати систему контролю якості, яка перевіряє правильність проведення процедури калібрування та виявляє можливі неточності.

Отже підвищення точності вимірювань під час калібрування інструменту є ключовим аспектом для забезпечення якості продукції та ефективності виробничих процесів. Аналізуючи різноманітні фактори, що впливають на точність калібрування, було встановлено, що якість вимірювальних стандартів, налаштування обладнання, контроль умов навколишнього середовища та навчання персоналу є важливими складовими процесу підвищення точності.

## **Література**

1. Роценко, О.В. Підвищення точності вимірів при використанні комп'ютерних інструментів високої прецизії / О.В. Роценко, Л.В. Волошина // Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології : мат. II Міжнарод. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців, 29–30 листопада 2023 р., м. Київ. – Київ : Вид. Київський інститут залізничного тра-

нспорту Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. – Ч.2. – С. 364–367.

2. Тимофеева, Л.А. Розробка методики калібрування штангенциркулів / Л.А. Тимофеева, О.В. Роценко // Тези доп. 4-й Міжнарод. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології», 27–28 листопада 2023 р.. м. Харків. – Харків : УкрДУЗТ, 2023. –С. 352–354.

3. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT). Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

*Рябченко С.В., Бандуренко М.В., Сільченко Я.Л.,  
Федоренко В.Т.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна

## **ШЛІФУВАННЯ КОНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС КРУГАМИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

Зубошліфування – є одним із основних способів фінішної обробки загартованих зубчастих коліс, яке забезпечує 3–6 ступені точності і шорсткість поверхні  $Ra\ 0,20\text{--}1,2$ .

При сучасному розвитку технології можливе створення алмазно-абразивного інструменту з показниками, необхідними для забезпечення обробки деталей з високою ефективністю щодо заданих вимог якості і точності розмірів. При розробці нового абразивного інструменту важлива роль належить абразивним матеріалам і зв'язкам шліфувальних кругів.

Шліфування конічних зубчастих коліс здійснюється на спеціальних зубошліфувальних верстатах фірми «Gleason» (Німеччина). Шліфувальні круги для здійснення процесу обробки конічних зубчастих коліс являють собою інструмент складної форми. Це чашкові шліфувальні круги, що мають на торці пов'язані конічні поверхні по внутрішньому та зовнішньому діаметрам круга. Причому кут сполучення конічних поверхонь становить від  $20^\circ$  до  $60^\circ$ . Як абразивний матеріал для таких шліфувальних кругів використовуються різні типи електрокорундів – білий, рожевий або рубіновий (рис. 1). Використання надтвердих абразивних матеріалів на практиці зубошліфування конічних коліс не відоме.

Проведені дослідження показали, що в деяких випадках можна використовувати при шліфуванні конічних зубчастих коліс шліфувальні круги з синтетичного алмазу і кубічного нітриду бору. Нами розроблені чашкові шліфувальні круги діаметром 200 мм із надтвердих матеріалів для обробки конічних зубчастих коліс на зубошліфувальному верстаті фірми «Gleason» (рис. 2).

Результати випробування процесу шліфування зубчастих коліс чашковим кругом діаметром 178 мм з рубін-корунду показали, що потужність зубошліфування складає в середньому значенні  $P_{\text{ср}} = 900$  Вт при чистовому етапі шліфування, що менше потужності шліфування звичайними кругами з білого корунду на 15–20%. Точність обробки зубчастого колеса відповідає 4 ступені точності.



**Рис. 1 – Чашковий шліфувальний круг з рубін-корунду**



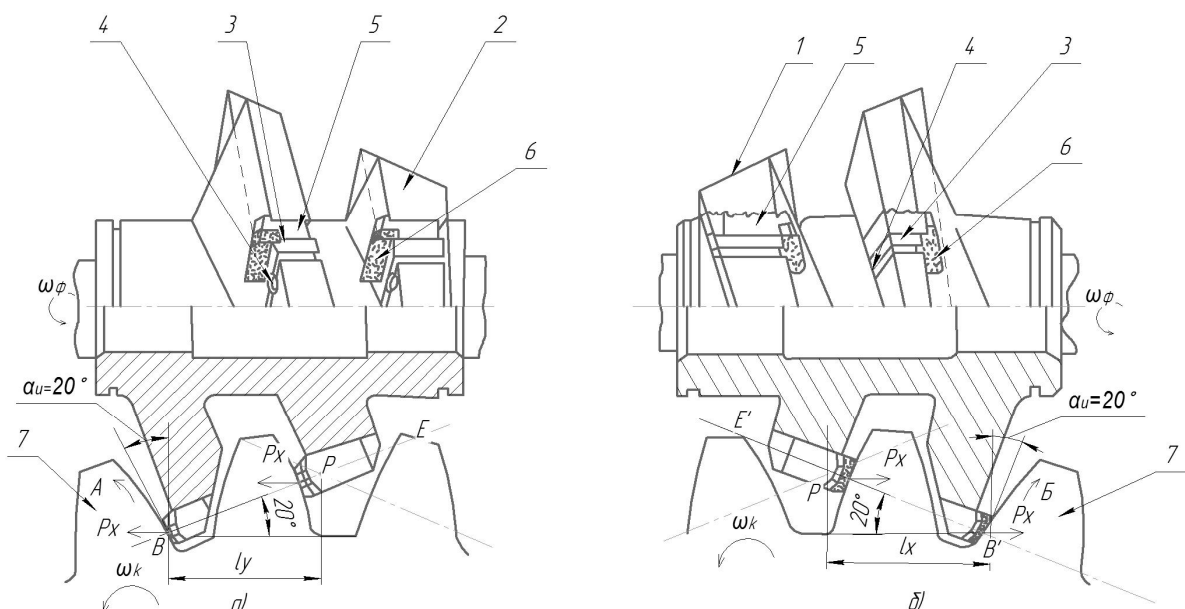
**Рис. 2 – Чашкові шліфувальні круги із надтвердих матеріалів**

Також проведені випробування кругів діаметром 200 мм з надтвердих матеріалів при шліфуванні конічних зубчастих коліс – модуль  $m = 5$  мм, число зубів  $z = 15$ . Результати випробувань показали, що при шліфуванні конічних зубчастих коліс з залізовуглецевих сплавів твердістю 65 HRC можливе застосування кругів з кубічного нітриду бору, а при шліфуванні коліс з титанових сплавів можливо застосування кругів з синтетичного алмазу. При чому, точність обробки зубчастих коліс відповідає 4 ступені точності.

*Рябченко С.В., Манохін А.С.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Камчатна-Степанова К.В., Пермяков Є.О., Федоренко В.С.* Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ НАРІЗАННЯ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ШЕВРОННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПІСЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ З ПРИПУСКОМ ПІД ЗУБОШЛІФУВАННЯ

Для нарізання крупномодульних шевронних циліндричних зубчастих коліс після відновлення розроблена двокорпусна конструкція фрез одностороннього різання призначена для оброблення зубів коліс за два проходи [1]. Фреза (рис. 1) складається з лівого і правого корпусів з конічною гвинтовою нарізкою одного напрямку в пазах якої монтуються твердосплавні непереточувані поворотні пластинки. Згідно з технологією зубооброблювання, розробленою для цієї конструкції, кожний із корпусів фрези встановлюється окремо на зубофрезерній оправці зі зміщенням відносно міжосьового перпендикуляру  $00'$  пари «інструмент-деталь».



**Рис. 1 – Двокорпусна універсальна фреза одностороннього різання:**  
*a* – правий корпус; *б* – лівий корпус

Установлювальна відстань не залежить від кількості зубів оброблюваного колеса. Величина зміщення фрези  $l_y$  визначається профі-

льним кутом вихідного контуру зубчастої рейки  $\alpha_0$ , висотою ніжки зуба  $h_f$  та радіусом закруглення головки зуба інструмента для попереднього нарізування  $r_{\delta}$ . Ці параметри залежать тільки від модуля і коефіцієнта зміщення вихідного контуру зубчастої рейки.

Установлювальна відстань визначається за формулою:

$$l_{\delta} = \frac{h_f - xm - r_{\delta} (1 - \sin \alpha_0)}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (1)$$

де  $x$  – коефіцієнт зміщення вихідного контуру зубчастої рейки;  $m$  – модуль зубів колеса.

Для коліс з вихідним контуром зубчастої рейки згідно з ГОСТ 13755, де  $\alpha_0 = 20^\circ$ ,  $h = 1,25m$  та при  $r_{\delta} = 0,3m$ , формула (1) спрощується та є наступною:

$$l_{\delta} = \frac{m(1,052 - x)}{0,36397}, \quad (2)$$

Таким чином, по черзі встановлюючи зі зміщенням на зуборізальній оправці кожний із корпусів, однією фрезою можна обробляти за два проходи зубчасті колеса з будь-якою кількістю зубів. Зміщення корпусу фрези з міжосьового перпендикуляру на розрахункову відстань  $l_y$  здійснюється за допомогою спеціального шаблону, що встановлюється в центрошукач верстату, який розміщується на фрезерній голівці у вісі обертання столу верстата.

При значеннях коефіцієнта зміщення первинного контуру  $x > 1,0$  величина установлюваної відстані  $l_y$ , розрахованої по (1) і (2), може набути від'ємного значення. Це означає, що при установленні інструмент необхідно переміщувати на верстаті так, щоб його перший зуб із найбільшим радіусом обертання не перетинав міжосьовий перпендикуляр.

Практично установлення інструменту на розрахункову відстань  $l_y$  не вимагає високої точності і може бути здійснене або за допомогою спеціального шаблону, або з використанням лінійки, що встановлена на верстаті.

У разі збігу напрямків дії  $P_x$  і  $\omega_k$  осьова сила прагне «відокремити» зуби розділового черв'ячного колеса від витків розділового черв'яка, і це може призвести до порушення гладкості роботи розділової черв'ячної пари верстату, коливанням оброблюваного колеса і зниженню якості його обробки.

У разі збігу напрямків дії  $P_x$  и  $\omega_k$  осьова сила прагне «відокремити» зуби ділильного черв'ячного колеса від витків ділильного черв'яка, а це може призвести до порушення плавності роботи діли-

льної черв'ячної пари верстату, коливань оброблюваного колеса та зниженню якості його обробки.

Для забезпечення однакових умов оброблення як за динамікою різання, так і за схемою зрізання припуску, корпуси фрези можна виконати з гвинтовою нарізкою різних напрямків. Наприклад: лівий корпус фрези має праву гвинтову нарізку, а правий корпус - ліву. У цьому випадку в процесі оброблювання осьові складові сили різання спрямовані назустріч обертанню колеса  $\omega_k$ , а знімання припуску обома корпусами йде в одному й тому ж напрямку від основи зуба до його вершини.

Для підвищення економічності використанні інструменту, обробку обох бічних поверхонь зубів колеса можна здійснювати тільки одним, наприклад, правим корпусом фрези, по черзі зміщуючи його вліво та вправо на зуборізальній оправці. У цьому випадку при обробці лівих бічних поверхонь є необхідним реверс напрямку обертання інструменту  $\omega_f$  та колеса  $\omega_k$ , а обробка здійснюється при попутному фрезеруванні.

### **Література**

1. Ключко, О.О. Чистове нарізання загартованих шевронних коліс обкатувальними різцями / О.О. Ключко, О.А. Анциферова, К.В. Камчатна-Степанова, Я.С. Антоненко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : мат. Міжнарод. наук.-техн. конф., 21–24 грудня 2020 року, м. Краматорськ. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – С. 45.

*Сахнюк І.О., Рудак Н.П., Федосєєва І.К.*  
Технічний центр НАН України, Київ, Україна

## **РОЛЬ МІЖНАРОДНИХ, ЄВРОПЕЙСЬКИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ ІЗ СТАНДАРТИЗАЦІЇ У ВІДБУДОВІ І «ЗЕЛЕНІЙ» РЕКОНСТРУКЦІЇ УКРАЇНИ**

На початку 2024 р. був проведений п'ятий заключний вебінар із серії «Зелена» реконструкція України. На цьому вебінарі, організованому разом із українським урядом, національним органом стандартизації України (НОС), з Організацією Об'єднаних Націй із промислового розвитку (UNIDO), з європейським партнером

CEN/CENELEC, обговорювалося, як технічні регламенти і стандарти можуть забезпечити можливість для підтримки муніципалітетів у відбудові і «зеленій» реконструкції України для того, щоб ідентифікувати шляхи відбудови України на муніципальному рівні ([https://youtu.be/73Dq-QH\\_gEs?si=DQYRRW58HNt0mUU3](https://youtu.be/73Dq-QH_gEs?si=DQYRRW58HNt0mUU3)). Тема п'ятого вебінару добре доповнює попередні семінари, які відбулися впродовж 2023 р. та фокусувалися на стандартах, технічних регламентах для проєктів «зеленої» реконструкції щодо «зелених» закупівель, оцінки відповідності, ринкового нагляду (<https://uas.gov.ua/kontakty/dlia-biznesu/>).

Із 2019 р. UNIDO плідно співпрацює з НОС, агентством з акредитації України і підтримало декілька органів оцінки відповідності для того, щоб вони надавали міжнародно визнані послуги. UNIDO шукає можливості для того, щоб підтримати «зелену» реконструкцію України. Україна і UNIDO об'єднали зусилля з Міністерством економіки України, з урядом України, з CEN/CENELEC для того, щоб сформувані рамки для технічних регулювань відбудови України. Уже багато років організації європейської системи стандартизації, зокрема відділ розроблення стандартів CEN/CENELEC, співпрацюють з Україною. Відомо, що у січні 2023 року ДП «УкрНДНЦ» стало афілійованим членом CEN/CENELEC і активно приймає участь у роботі. Керівництво CEN/CENELEC, співпрацюючи з ДП «УкрНДНЦ», намагається підтримувати всі роботи і зацікавлених стейкхолдерів. Участь муніципалітетів у роботі зі стандартизації є надзвичайно важливою.

Ідея UNIDO щодо інфраструктури якості полягає в тому, щоб обговорити план відновлення України та розробити план модернізації, що надаватиме можливість прискореного зростання сталої економіки. UNIDO брала участь у багатьох ініціативах із відбудови, із вдосконалення інфраструктури якості країн, із розроблення національних керівних рамок стандартів та технічних регламентів. Є багато складних взаємозв'язків, коли про технічні регламенти говориться в контексті «зеленої» реконструкції. У загалі, відповідні технічні регламенти мають бути погоджені і прийняті й підтримуватися стандартами. Цей новий підхід ЄС, як філософія нових законодавчих рамок, має бути узгоджений з ініціативами ЄС. У цьому контексті говориться, зокрема, про єврокоди, які стосуються «зеленої» реконструкції. Єврокоди у будівництві — це комплекс стандартів із проєктування конструкцій, розроблених Європейським комітетом стандартизації CEN із початку 1990-х років з метою охоп-

лення питання проєктування несучих конструкцій. Єврокоди разом з євростандартами являють собою замкнений апарат керування надійністю та контролю довговічності будівлі, що відповідає національній системі. UNIDO використовує на підтримку «зеленої» реконструкції не лише стандарти екологічні, але також стандарти, які стосуються сталих закупівель, проєктування для енергоефективності, матеріалів, методів будівництва тощо.

Отже, у тому, що стосується масштабів того, наскільки розгорнеться відбудова, потрібно говорити про прийняття регламентів ЄС, про прийняття стандартів, які повинні бути перенесені в законодавство, і повинні застосовуватися на локальному, на місцевому муніципальному рівні.

Проте, чи належним є загальне просте прийняття регламентів та стандартів ЄС без врахування контексту? Багато з прийнятих європейських регламентів або прийнятих стандартів не були навіть перекладені українською мовою. Чи призведе це до уникнення ризиків та такої ситуації, щоб мати оце все портфоліо регламентів і стандартів, щоб вони не були просто такими теоретичними, тобто нереальними для застосування, для виконання? Звичайно, маємо прийняти регламенти ЄС, стандарти задля «зеленої» реконструкції, але визначити і зрозуміти контекст, що вимагається і є належним. Це може включати в себе складні рішення, усі повинні працювати узгоджено на всій території країни і саме над виконанням того, що буде погоджено в тендерах, контрактах, спостереженні.

Питаннями відбудови і питаннями технічного регулювання у будівництві в Україні опікується Департамент технічного регулювання у будівництві Міністерства розвитку громад територій та інфраструктури. Одна з ключових передумов для ефективною реалізації проєктів відновлення пошкоджених об'єктів – це відповідна сучасна нормативна база у будівництві. У цьому напрямі департамент плідно співпрацює з проєктами міжнародної технічної допомоги і з НОС. Міністерством в минулому році було затверджено низку нових державних будівельних норм. Дуже актуальна на сьогодні проблема — це відповідність норм законодавству, що є обов'язковим, в будь-яких проєктах нового будівництва реконструкції і в тих проєктах, що направлені на відбудову. Міністерство також опікується питаннями забезпечення вимог до будівельної продукції і будівельних норм. У минулому році близько 100 національних стандартів було розроблено і передано до НОС на затвердження за відповідною бюджетною програмою. У 2024 р. міністерство також запланувало розроблення близько 100 стандар-



тів з ідентичним ступенем відповідності до міжнародних та європейських стандартів.

Отже, сьогоденні дії задля відновлення та реконструкції України мають бути скоординовані по регіонах, по місцях. Роль стандартизації і важливість стандартів у підтримці «зеленої» реконструкції муніципалітетів мають велике значення. Стандарти надають перевагу не лише бізнесу, але й споживачам. Стандарти також підтримують стратегії і регламенти ЄС. Завдяки стандартам можна зменшити ризики і затрати, покращити продуктивність, безпеку, демонструвати лідерство на ринку, створити ринки для інноваційної продукції і послуг.

*Сергєєв Д. М. ПНВП "МІКРОТЕХ"*

*Комарова Г. Л., Волошина Л. В. Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна*

## **АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

До цього часу найбільш відомими дослідженнями еволюції ЗВТ були інформаційні матеріали японських фахівців, при цьому вони: були обмежені проміжком часу до 2012 р.; не охоплювали четверту промислову революцію «Industry 4.0»; були неповними та ангажованими стосовно японської компанії Mitutoyo. Дослідимо 170-річну еволюцію ЗВТ на підставі вивчення понад 1200 патентів за видами та типами цих засобів, а також історичну кореляцію з усіма промисловими революціями. Розглянемо конструктивно-метрологічні особливості ЗВТ зі штанген-, мікрометричним та індикаторним відліком: штангенінструмент та мікрометричний інструмент (окрім мікрометричних голівок) забезпечують абсолютні вимірювання завдяки наявності двох вимірювальних наконечників (рухомого та нерухомого); індикатори забезпечують відносні вимірювання (окрім абсолютних вимірювань для індикаторних товщиномірів, індикаторних глибиномірів, індикаторних нутромірів, індикаторів на стійках та штативах); мікрометричний та індикаторний вимірювач мають відповідні пристрої для забезпечення тарованих зусиль вимірювань, на відміну від традиційного штангенінструменту; за офіційними міжнародними стандартами, найбільший діапазон вимірю-

вань (до 2000 мм) забезпечують традиційні штангенциркулі, при цьому їхня похибка дорівнює 30–60 мкм; за офіційними міжнародними стандартами, найкращу похибку (2–13 мкм) у діапазоні до 500 мм забезпечують традиційні мікрометри; інноваційні подовжені штангенциркулі-трансформери та мікрометртрансформери забезпечують діапазон вимірювань до 10000 мм. Близько 250 р. тому в Англії з'явилися перші металообробні дільниці (заготівельні, свердлильні та шліфувальні) для виробництва парових машин, які сприяли прискореному розвитку механізованих виробництв, залізничного транспорту, а також серійному ткацькому виробництву. Початок металооброблення виявив потребу у промислових геометричних вимірюваннях із використанням професійного вимірювача, однак це настало значно пізніше.

Фахівці поділяють 250-річний промисловий період людства на чотири етапи промислових революцій (за міжнародною термінологією «Industry» з відповідними порядковими номерами етапів).

Етап 1. Перша промислова революція Першу промислову революцію «Industry 1.0» (середина XVIII – середина XIX ст.) пов'язують із появою в Англії перших парових двигунів, початком одиничного механічного виробництва та серійного ткацького виробництва, що забезпечило Англії перевагу та безумовне світове промислове лідерство наприкінці XVII сторіччя. Для виробництва парових машин англійці Джозеф Вітворт та Джеймс Ватт започаткували перші прецизійні геометричні ЗВТ у виді першої стаціонарної вимірювальної машини з дискретністю 0,254 мкм та мікрометричного таблетопу з дискретністю 2,54 мк.

Етап 2. Друга промислова революція Друга промислова революція «Industry 2.0» (друга половина XIX – 1939 р.) пов'язана з початком використання електричного струму та масового механічного виробництва. У цю пору промислову ініціативу перехопили США, де завдяки досягненням багатьох талановитих новаторів (Едісон, Тесла, Генрі Форд) почалося масове виробництво електромоторів та генераторів, різноманітних автомобілів та будівельних машин. Це потребувало виготовлення великої кількості механізмів обертання, контроль за биттям яких могли забезпечити тільки новітні годинникові індикатори, перший з яких був запатентований у 1883 році у США. У період другої промислової революції «Industry 2.0» увійшли у вжиток ЗВТ другого покоління, до яких належать: штангенциркуль з редуктором та круговою шкалою, запатентова-

ний у 1907 році американцями, що зменшило похибку та спростило зчитування показників вимірювань.

Етап 3. Третя промислова революція Після Другої світової війни почалася третя промислова революція, яка припала на період відновлення Європи та Японії, глобальної гонитви озброєнь, що суттєво прискорило перехід на новий рівень виробництва з відповідними вимогами до контролю та якості. Період третьої промислової революції «Industry 3.0» пов'язують із цифровими та комп'ютерними технологіями, автоматизованими та роботизованими виробництвами. На розвиток ЗВТ найбільший вплив справили такі революційні інновації: перша цифрова обчислювальна машина (ЦОМ) моделі Z3 з'явилася в США у 1941 році; перший 2D-верстат з ЧПК (з перфорованою стрічкою) з'явився у США у 1952 р.; перша автоматична контактна 3D КВМ з'явилася в Англії у середині 1970-х років (це навіть раніше, ніж поява цифрових електронних ЗВТ).

Етап 4. Четверта промислова революція Багаторічні протиріччя з відставанням рівня РГ ЗВТ були значною мірою вирішені з початком четвертої промислової революції «Industry 4.0». Подальший стрімкий розвиток цифрових та комп'ютерних технологій, повне мережеве охоплення соціальних та промислових сфер суспільства (кількість бездротових пристроїв перевищила чисельність населення планети) призвели до «Industry 4.0» у 2011 р. Четверта промислова революція зумовила відповідні вимоги до всіх складових, включаючи промислове виробництво: інноваційне підприємство «Factory 4.0» за вимогами «Industry 4.0»; інноваційні верстати «Machine 4.0» у складі «Factory 4.0»; інноваційна метрологічна служба «Metrology 4.0» у складі «Factory 4.0»; інноваційні РГ ЗВТ четвертого покоління у складі «Metrology 4.0».

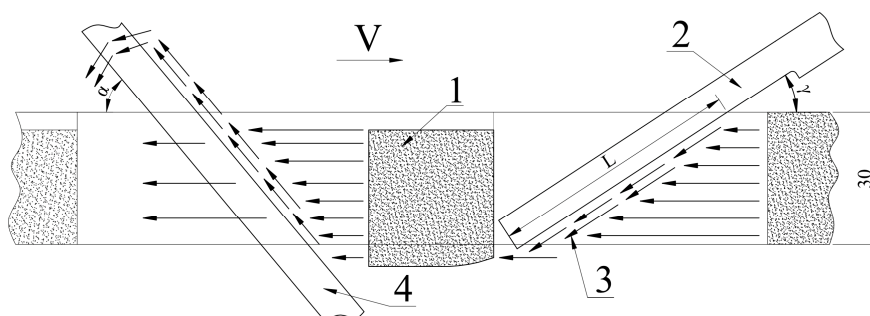
Доволі часто американські та японські виробники РГ ЗВТ посилаються на впровадження системи «Metrology 4.0», при цьому фактично обмежуються передаванням та обробленням інформації з використанням хмарних інформаційних технологій, однак не враховують обов'язкових вимог.

## **ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СТРИЖНЕВОГО ЕЛЕМЕНТУ У ВАННІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ**

У сучасному виробництві вдосконалення фінішної обробки, є одним із ключових аспектів покращення технологічного процесу. Магнітно-абразивна обробка (МАО) дозволяє забезпечити отримання низької шорсткості поверхні деталей. Під час МАО значна рухливість магнітно-абразивного порошку (МАП) є позитивною характеристикою, оскільки вона сприяє підвищенню частоти взаємодії абразивних зерен із поверхню деталей, що оброблюють. Завдяки особливостям МАО у ванні кільцевого типу з великими магнітними зазорами, в ній можна виконувати обробку складнопрофільних та довгомірних деталей. На рис. 1 схематично зображено особливості руху МАП (1), в результаті взаємодії із нахиленою заготовкою (2). Аналіз переміщення порошку в процесі МАО нахилених заготовок (2) показав, що він, рухаючись вздовж обробленої поверхні (3) витісняється поза робочу зону де процес МАО не відбувається. У попередніх роботах [1] для формування рівномірного розподілення МАП по висоті робочих зазорів була запропоновано використання відновлювальних стрижневих елементів (ВСЕ) (4), які забезпечують відновлення властивостей магнітно-абразивного інструменту по висоті зазору і підтримує його в відносно стабільному стані на протязі технологічного циклу обробки. В результаті чого має місце збільшення ефективної довжини обробки, та відповідної продуктивності. Але при цьому відбувається неконтрольоване витіснення порошку за межі робочої зони, який за умов зменшення величини магнітного поля за межами робочого зазору, під дією відцентрових сил викидає з неї.

Експерименти проводилися із використанням діамгнітної заготовки із латуні діаметром 10мм, із лискою шириною 6мм та довжиною 75 мм. Заготовка при обробленні розташовувалася під кутом  $\gamma = 35^\circ$ , максимальна глибина обробки складає  $L = 54$  мм, ВСЕ має діаметр 11 мм, та розташований під кутом  $\alpha = 50^\circ$ . Частота обертання навколо осі кільцевої ванни  $V = 250$  об/хв, магнітна індукція  $B = 0,225$  Тл. Ви-

користуюють МАП Феромап фракції 630/400 мкм, із МОТС Асфол. Коефіцієнт заповнення робочої зони складає  $K_z = 0,8$ .



**Рис. 1 – Характер переміщення МАІ у робочій зоні при МАО стрижневої деталі з використанням ВСЕ**

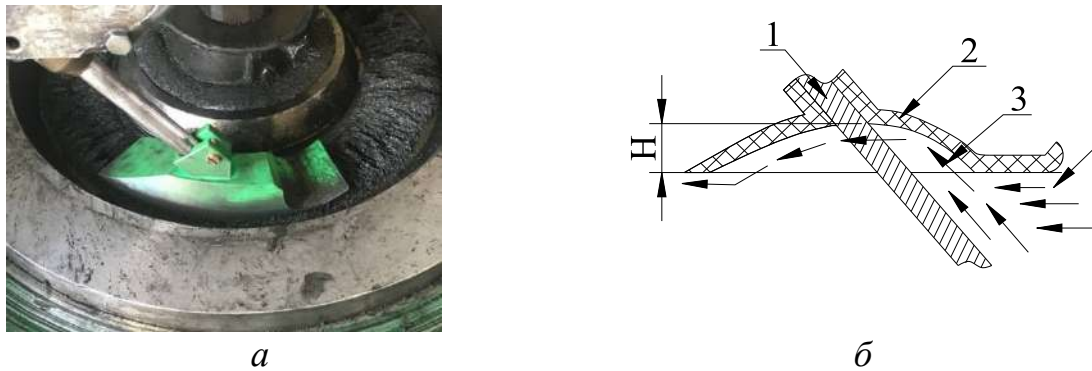
Для оцінки ефективності використання ВСЕ контролювали зміну шорсткості оброблюваної поверхні в порівнянні з необробленою. Зміна шорсткості,  $\Delta Ra$ , оцінюється відносно середнього значення необробленої поверхні, по всій глибині обробки. А ефективна глибина визначається порівнянням шорсткості контрольної поверхні до МАО та обробленої, при  $\Delta Ra > 5\%$  на відповідній ділянці. Її значення наводяться у відсотках відносно максимальної глибини оброблення. Порівняння модифікацій відбувається із значеннями отриманими при обробленні із ВСЕ.

Для покращення процесу відновлення і запобігання розкиданню порошка за межі робочої зони було запропоновано використання декілька модифікацій ВСЕ, які мають на меті покращити заповнення МАП робочої зони. Першою такою конструкцією є купол (2) (рис. 2), який встановлюється на ВСЕ (1) в верхній частині робочого зазору. Характер перенаправлення порошку (3) за умов використання на ВСЕ (1) додаткового пристосування типу купол (2) наведено на рис. 2. Характерним параметром додаткового пристосування (2) є його висота -  $H$ .

Аналіз виконаних досліджень показав, що купол із висотою  $H = 22$  мм забезпечує зміну ефективної довжини на 148,2% та шорсткості поверхні –  $\Delta Ra$  на 128%, а висотою  $H = 8$  мм зміну ефективної довжини на 98,2% та  $\Delta Ra$  на 87,4%

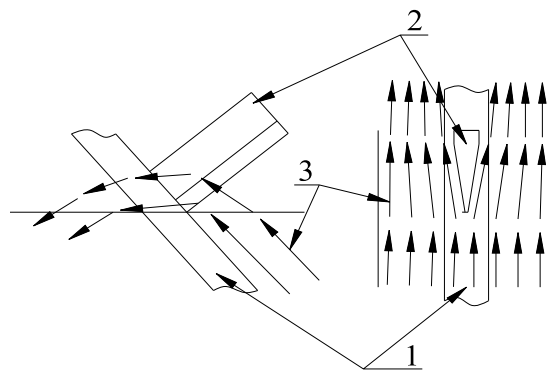
Іншою модифікацією пристосування для ВСЕ є клиновий елемент (2) встановлений на ВСЕ (1) в верхній частині робочого зазору (рис. 3). Таке його розташування впливає на процес обтікання МАП ВСЕ. Завдяки розділенню єдиної маси порошку, яка витискається,

та її притягання до полюсів магніту, покращується відновлення та запобігається надмірне витискання.

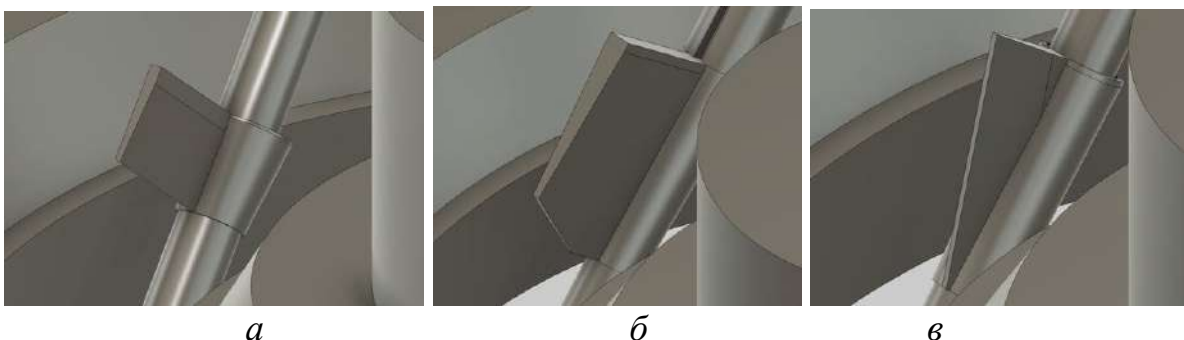


**Рис. 2 – Розташування пристосування типу купол в робочій зоні (а) і схематичне зображення принципу роботи (б)**

Було досліджено модель короткого клину рис. 4, а, який забезпечив зміну ефективної довжина на 117,8% та  $\Delta Ra$  на 76,8%. Для покращення розподілення порошку по глибині робочої зони, запропоновано використання довгого клину рис. 4, б, який розрізає масу порошку у робочій зоні, що дозволило змінити ефективну довжину на 108,9% та  $\Delta Ra$  на 78,4% і модель гострого клину, рис. 4, в, яка змінює ефективну довжину на 128,6% та  $\Delta Ra$  на 132%.



**Рис. 3 – Схема встановлення клинового елемента на ВСЕ і його обтікання порошком**



**Рис. 4 – Моделі різних форм клину: а – короткий, б – довгий, в – гострий**

Таким чином найкращими конструкціями для модифікації ВСЕ є гострий клин та купол із висотою  $H = 22$  мм. Призначення однієї чи іншої конструкції пристосування має робитися виходячи із призначеного технологічного процесу та геометрії оброблюваних заготовок, через їх вплив на витіснення порошку за межі робочої зони.

## Література

1. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу / І.В. Ткачук : дис. канд. техн. наук. – Київ, 2015. – 164 с.

*Скульский В.Ю., Прокоф'єв О.С., Губатюк Р.С.,  
Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Гаврик А.Р.,  
Абдулах В.М. Інститут електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна*

## **ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АКТИВУЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ТРУБ У ТРУБНИХ ДОШКАХ РЕКУПЕРАТОРІВ**

Одним із способів продовження експлуатації рекуператорів є відновлення поверхонь труб у місці їх входження у трубні дошки або фланці, які дістали пошкодження в процесі роботи. В цих місцях у трубах можуть утворюватися різні дефекти, такі як тріщини від гідроударів і вібраційних навантажень, ерозії поверхні внаслідок термохімічного впливу робочих речовин, що транспортуються, утворення пор, або групи пор під накипом і відкладаннями та ін. Утворенню дефектів сприяє і напружений стан зварного з'єднання труб із трубними дошками, якщо не було здійснено його термічну обробку.

З метою відновлення внутрішніх поверхонь труб у місцях їх входження у трубні дошки або фланці, при наявності до них доступу, запропоновано спосіб ремонту, який полягає у заведенні у труби трубних втулок меншого діаметру і певної довжини. Довжина трубної втулки, яка вводиться у трубу із боку фланця або трубної дошки визначає довжину ділянки відновленої внутрішньої поверхні труби, на якій перекриваються дефекти. Трубна втулка, після введення у трубу, фіксується шляхом розробленого у Інституті елект-

розварювання ім. Є.О. Патона НАН України способу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин в зоні з'єднання з подальшою пластичною деформацією зварюваних поверхонь без розплавлення основного металу [1–5]. Утворюється з'єднання, подібне до телескопічного.

При індукційному зварюванні тиском забезпечується формування якісного зварного з'єднання труб, міцність якого, з урахуванням розвинутої поверхні з'єднання, наближена до міцності основного металу. При цьому, застосована активуюча речовина частково залишається у проміжку між внутрішньою поверхнею труби, яка підлягає відновленню, і зовнішньою поверхнею трубної втулки, заповнюючи дефектні місця. Нагрівання місця з'єднання здійснюється безконтактно, введенням у втулку і трубу подовжнього індуктора.

Активуючі речовини в зоні шва при їх розплавленні утворюють рідку фазу, активують й частково легують метал поверхонь труби і втулки та захищають зону зварювання від атмосферних впливів, що дозволяє знизити температуру проведення процесу зварювання. Формування і утворення зварного з'єднання відбувається в твердій фазі, практично без розплавлення основного металу. Температура проведення процесу визначається температурою плавлення застосованих активуючих речовин, яка нижча за температуру плавлення основного металу і температурою пластичної деформації основного металу. Прикладання тиску і подальша пластична деформація зварного з'єднання сприяє видаленню із зони шва зайвих продуктів активації. Прикладання тиску може здійснюватися спеціальним пристроєм, або протяжкою відразу після процесу нагрівання і видалення індуктора.

На рис. 1 показано виконане з'єднання трубної втулки з трубою в трубній дошці.

Перевагами способу індукційного зварювання тиском із застосуванням активуючих речовин є формування зварного з'єднання, рівномічного основному металу і практично без його розплавлення, збереження первинної структури металу без небажаних фазових перетворень, контрольована деформація зварювальних поверхонь, відсутність необхідності забезпечення ка-



**Рис. 1 – З'єднання трубної втулки з трубою в трубній дошці**



пілярних зазорів між поверхнями, відносна простота процесу з'єднання і можливість його автоматизації.

### **Література**

1. ДСТУ 3761.2-98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення (ISO 857:1990). [Чинний від 1999-07.01. Зміни 2006-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 1999. 64 с.
2. Pis'menny A.S. High-frequency welding of metals / Ed. by V. E. Paton. – Amsterdam : Harwood Acad. Publ., 1997. – 150 p.
3. Письменный, А.С. Высокочастотная сварка металлических изделий / А.С. Письменный; под. ред. Б.Е. Патона. – Київ : Ин-т электросварки им. Е.О. Патона, 2008. – 178 с.
4. Vollmer, M. Induction Butt Welding Followed by Abnormal Grain Growth / M. Vollmer, D. Baunack, D. Janoschka, T. Niendorf // A Promising Route for Joining of Fe-Mn-Al-Ni Tubes. *Shap. Mem. Superelasticity*. – 2020, № 6. – P. 131–138.
5. Прокофєв, О.С. Індукційне зварювання труб і трубної арматури із застосуванням активуючих речовин (Огляд) / О.С. Прокофєв, Р.С. Губатюк, С.В. Римар, В.М. Абдулах, О.І. Петрієнко, В.С. Сенчишин // *Автоматичне зварювання*. – 2023. – № 7. – С. 37–47.

*Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, Київ, Україна

### **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ФОРМИ КЕРАМІЧНИХ ШАРИКІВ ПІДШИПНИКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

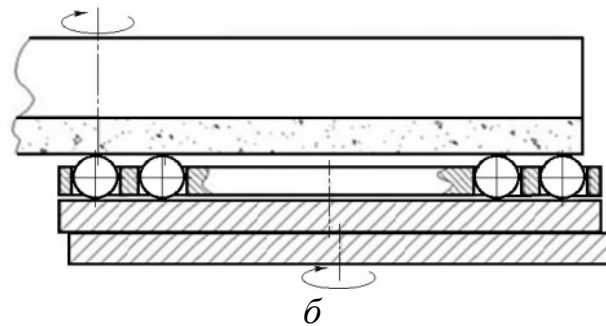
Задачею алмазного формоутворюючого шліфування заготовок керамічних шариків є надання останнім сферичної форми для наступного уточнення цієї форми алмазним доведенням. Цілком очевидно, що підвищення точності формоутворення сферичної поверхні шариків шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на алмазно-абразивне доведення.

Таким чином метою даного дослідження процесу алмазного шліфування керамічних шариків з їхнім базуванням на площині і рухом подачі за епіциклоїдою було встановлення закономірностей уточнення форми шариків залежно від геометричних параметрів такої схеми процесу за незмінного режиму обробки, ефективність якого доведена в [1]. Як і в [1, 2], точність форми керамічних шариків оцінювали показником непостійності діаметра шарика, який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах шариків, і показником форм – фактору круглограм, отриманих вимірюванням некруглості на круглограмі у трьох взаємно перпендикулярних перерізах шарика. Останній дозволяє кількісно оцінити співвідношення довжини круглограми й площі, охопленої лінією профілю шарика.

Як показали результати попередніх експериментальних досліджень, вплив режимів обробки на підвищення точності форми шариків обмежено можливостями існуючого технологічного обладнання і практично вичерпано. Недоліком існуючих технологічних схем є виникнення нерівномірності зношування робочої поверхні круга, особливо поблизу осі його обертання або краю круга, яка негативно впливає на точність шариків і пов'язана насамперед з незмінністю траєкторій кругової подачі шариків, а також схемою розташування шариків у сепараторі та інш. Тому подальше удосконалення технологічних схем полягає на наш погляд у введенні руху подачі заготовок шариків за епіциклоїдою, що досягається зміщенням осі обертання сепаратору із шариками на певний ексцентриситет відносно осі обертання столу верстата (рис. 1). Така схема обробки сприяє додатковому рухові заготовок уздовж стінок отворів обертового сепаратора під дією відцентрових сил з намаганням заготовок зайняти положення з мінімумом роботи цих сил, що сприяє зменшенню несферичності оброблюваних заготовок. Наразі не досліджено закономірності впливу зазначеної технологічної схеми шліфування, як і варіювання геометричними параметрами цієї схеми (як-от перекриття осі обертання круга окружностями розташування отворів сепаратора для розміщення шариків — зовнішньою або внутрішньою, співвідношення кількості шариків на цих окружностях, розташування поля траєкторій подачі шариків відносно осі обертання круга) на точність керамічних шариків і характер зношування круга.

Алмазне шліфування заготовок керамічних шариків з нітриду кремнію проводили на технологічному стенді на базі верстата мод. 6Т12-1 з встановленим на його робочому столі технологічним

пристроєм для базування на площині вільно обертових у отворах також вільно обертового сепаратора заготовок керамічних шариків. У досліджах ексцентриситет осі обертання сепаратора складав 3 мм, досліджувані траєкторії подачі шариків забезпечувало розташування отворів у сепараторі на окружностях діаметром у 147 і 119 мм. Через такі геометричні співвідношення перекриття осі обертання круга полем траєкторії подачі шариків здійснювалося або зовнішньою окружністю отворів, або внутрішньою окружністю отворів під час зміщення пристрою від зазначеного положення до центру на 14 мм. Симетричне або несиметричне розташування поля траєкторій відносно осі обертання круга забезпечувало зміщення пристрою від обох зазначених положень на 3 мм.



**Рис. 1 – Ексцентричне розташування технологічного пристрою з сепаратором на столі верстату – а, й схема базування й подачі куль – б**

Алмазний шліфувальний круг форми 6А2Т 300×3 (з розташуванням суцільного алмазного шару на торці круга) містив алмази марки АС32 зернистістю 200/160 і концентрацією 100% на металевій зв'язці М2-01. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних шариків складала 16 шт. Незмінний режим шліфування заготовок шариків було обмежено швидкістю шліфування у 29,5 м/с ( $n_k = 1600$  об/хв) і швидкістю обертання столу пристрою у 2,2 м/с ( $n_3 = 275$  об/хв) за дискретної подачі круга на врізання у  $10^{-5}$  м кожні 5 хв (0,01 мм/5 хв). Час проведення кожного дослідження – 30 хв.

Показниками точності форми керамічних шариків були непостійність діаметра шарика  $V_{Dws}$  (позначення згідно ISO 3290-2:2014) й форм-фактор круглограми шліфованого шарика  $f_r$ . Форм-

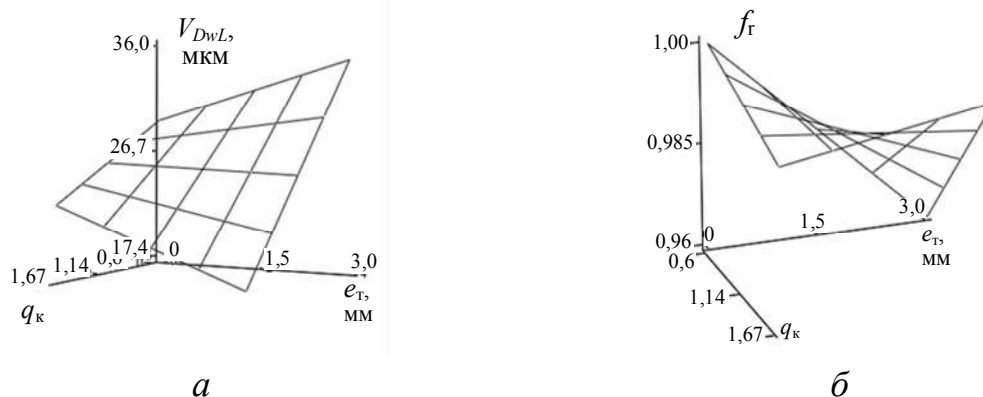
фактор круглограми шліфованого шарика обраховували для кожної круглограми за формулою  $f_r = p_r^2 / 4\pi A_r$ , де  $p_r$  – довжина круглограми,  $A_r$  – площа фігури в межах контуру круглограми [1].

Непостійність діаметра шарика  $V_{Dws}$  (як різницю найбільшого й найменшого одиничного діаметра шарика згідно стандарту) визначали за круглограмами, отриманими у трьох взаємно перпендикулярних перерізах куль на кругломірі мод. МК 300, оснащеному електронними блоком для виводу цифрових даних на персональний комп'ютер [1]. Середню стандартну похибку вимірювання  $V_{Dws}$  обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок вимірювання  $V_{Dws}$  п'яти шариків у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів за виключенням результатів, які явно відрізняються серед інших. Середня стандартна похибка вимірювання  $V_{Dws}$  склала 1,4 мкм. Аналогічним чином середню стандартну похибку  $f_r$  обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок  $f_r$  п'яти шариків у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів. Середня стандартна похибка визначення  $f_r$  склала  $1,5 \cdot 10^{-3}$ .

Досліджували вплив геометричних показників обраної схеми шліфування за незмінного режиму обробки на точність форми керамічних шариків. За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу  $2^3$  визначали коефіцієнти впливу: перекриття  $c_T$  осі обертання круга траєкторіями подачі шариків — зовнішньою або внутрішньою, співвідношення  $q_k$  кількості шриків на зовнішній і внутрішній траєкторіях, розташування поля траєкторій  $e_T$  відносно осі обертання алмазного круга — симетричного або несиметричного. Оскільки ПФЕ типу  $2^3$  містить кінцеву кількість дослідів, він дозволяє отримати лише вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння й лише у випадку, коли на меті є виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку. План повного факторного експерименту передбачав варіювання трьома факторами на наступних двох рівнях: перекриття  $c_T$  осі обертання круга — зовнішньою (–1) або внутрішньою (+1) окружностями розташування отворів у сепараторі, співвідношення  $q_k$  кількості куль у отворах на зовнішній і внутрішній окружностях — 6/10 й 10/6, розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга — симетричне ( $e_T = 0$  мм) й несиметричне ( $e_T = 3$  мм).

Як показали розрахунки на основі отриманої моделі непостійності діаметра шариків  $V_{DwL}$  (рис. 2, а), їх значення в діапазоні 15–20 мкм (бажане для подальшого алмазно-абразивного доведення) слід очікувати за умови співвідношення  $q_k$  на рівні 1,67 й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга (ексцентриситет  $e_T = 3$  мм).

Виходячи з отриманої моделі форм-фактору  $f_r$  (рис. 2, б), зниження зазначених геометричних параметрів схеми шліфування куль до мінімальних значень в межах дослідженого діапазону сприяє підвищенню  $f_r$  до значення 0,995, тобто найближче до 1,00 – рівня найменших відхилень форми шарика від геометрично правильної.



**Рис. 2 – Моделювання змінювання  $V_{DwL}$  (а) й  $f_r$  (б) залежно від геометричних показників обраної схеми шліфування**

Підсумовуючи отримані результати слід наголосити, що пріоритетом під час вибору тих чи інших геометричних параметрів досліджуваної схеми шліфування шариків є отримання шліфованих шариків із значеннями непостійності діаметра  $V_{DwL}$  в діапазоні 15–20 мкм, тобто варто вибирати співвідношення  $q_k$  на рівні 1,67, а  $e_T = 3$  мм. За такої умови значення форм-фактору  $f_r$  (0,994) кута  $\lambda$  (–1,1262) будуть не найкращими з тих, які можна досягти. А значення швидкості  $v_\lambda$  сприятиме збільшенню кута нахилу  $\lambda$ , що змусить за деякий час змінити умови шліфування.

Таким чином, в результаті виконаних експериментальних досліджень процесу алмазно-абразивного шліфування керамічних шариків з нітриду кремнію з їхнім базуванням на площині й руху подачі заготовок шариків за епіциклоїдою було встановлено закономірності уточнення форми шариків від геометричних параметрів прийнятої схеми процесу. Показано, що вплив геометричних параметрів для означеної схеми технологічного процесу шліфування адекватно описується

лінійними залежностями обраних показників процесу з певним впливом нелінійності за рахунок ефектів взаємодії від співвідношення кількості шариків на окружностях розташування отворів у сепараторі пристрою й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазно-абразивного круга за незмінного перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі.

Сприятливим для підвищення точності форми шариків слід вважати перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі, співвідношення кількості шариків на окружностях розташування отворів на рівні 1,67 й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ( $e_T = 3$  мм) за незмінного режиму обробки: швидкість шліфування 29,5 м/с і швидкість обертання столу технологічного пристрою 2,2 м/с й дискретної подача круга на врізання у  $10^{-5}$  м кожні 5 хв.

### **Література**

1. Sokhan', S.V. Diamond Grinding of Ceramic Balls with a Circular Feed / S.V. Sokhan', V.V. Voznyi, V.G. Sorochenko, M.P. Hamaniuk // J. Superhard Mater. – 2023. – Vol. 45, №. 4. – P. 293–305.

2. Sokhan', S.V. Grinding of Ceramic Balls in an Annular Groove / S.V. Sokhan', V.V. Voznyi, V.G. Sorochenko, M.P. Hamaniuk // J. Superhard Mater. – 2024. – Vol.46 (до друк).

*Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В.,  
Сороченко Т.А. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна*

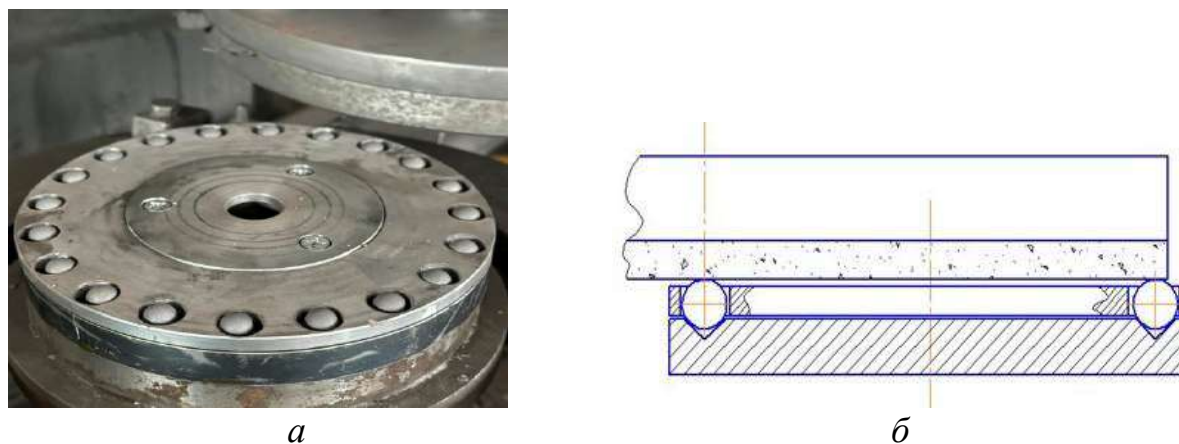
## **ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ ШАРИКІВ У КІЛЬЦЕВІЙ КАНАВЦІ НА ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО КРУГА**

Представлено результати експериментального дослідження впливу технологічних режимів шліфування керамічних шариків із нітриду кремнію підшипникового призначення в кільцевій канавці на зношування алмазно-абразивного круга. Показниками зношу-

вання робочої поверхні круга прийнято кут нахилу  $\lambda$  робочої поверхні у радіальному напрямку і коефіцієнт  $k_p$  складової другого порядку квадратичного рівняння апроксимації профілю у вказаному напрямку – іншими словами коефіцієнт кривизни, для обрахунку яких вимірювали усереднену координату  $y_m$  профілю поверхні.

Технологія виготовлення прецизійних шариків з керамічних матеріалів підшипникового призначення з урахуванням постійного удосконалення самих керамічних матеріалів потребує і неодмінного удосконалення технології їх алмазно-абразивної обробки. Метою даного дослідження було встановити закономірності зношування алмазно-абразивного круга залежно від режиму безперервного алмазного шліфування торцем круга у кільцевій канавці V-подібного профілю.

Алмазно-абразивне шліфування заготовок керамічних шариків з нітриду кремнію виконували на технологічному стенді на базі вертикально-фрезерного верстату мод. 6Т12-1 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для здійснення кругової подачі вільно обертових заготовок керамічних шариків у кільцевій канавці V-подібного профілю і розміщених у отворах також вільно обертового сепаратора (рис. 1). Умовами дослідження обмежено режим обробки заготовок шариків в діапазоні швидкостей шліфування 6,6–14,7 м/с і швидкостей подачі шариків 1,3–2,1 м/с.



**Рис. 1 – Розташування отворів у сепараторі технологічного пристрою (а), і схема базування шариків у кільцевій канавці V-подібного профілю (б)**

Алмазно-абразивний шліфувальний круг форми 6А2Т 300×3 містив алмази марки АС32 зернистістю 200/160 на металевій зв'язці М2-01 і концентрацією алмазів 100%. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних шариків складала 20 шт.

Вимірювання координати  $y_i$  профілю поверхні круга проводили безпосередньо на верстаті за допомогою індикатора часового типу ГЧ-10 з ціною поділки шкали 0,01 мм і збільшеною довжиною вимірювань, закріпленого на штативі, як описано в [1]. Показник  $y_m$  обраховували після безпосереднього вимірювання координати  $y_i$  робочої поверхні круга у реперних точках у трьох радіальних напрямках й наступного усереднення.

За обрахованими значеннями  $y_m$  будували квадратичні – як найбільш адекватні даним дослідів – апроксимаційні моделі змінювання координати профілю  $y_r = f(r)$  залежно від радіусу поверхні круга, коефіцієнти яких при лінійному й квадратичному членах слугували показниками зношування круга. Перший з них є тангенсом кута нахилу  $\lambda$  робочої поверхні круга у радіальному напрямку, а другий – коефіцієнтом кривизни  $k_p$ .

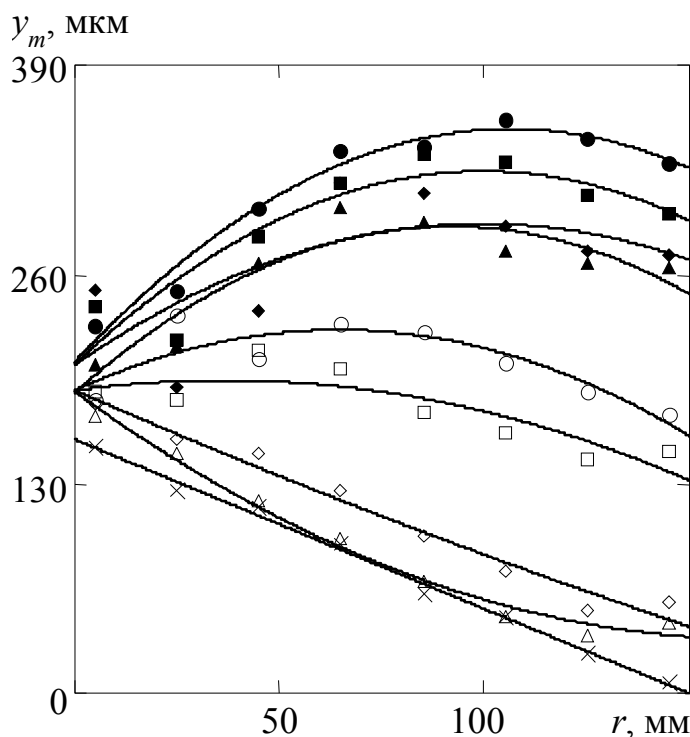
За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу  $2^3$  [2] визначали коефіцієнти впливу режиму обробки: поєднання дискретної подачі круга на врізання  $s_b$ , частоти кругової подачі заготовок  $\omega_3$  і частоти обертання алмазно-абразивного круга  $\omega_k$ . План експерименту передбачав варіювання факторами на наступних двох рівнях: дискретної подачі  $s_b$  –  $2 \cdot 10^{-5}$  і  $5 \cdot 10^{-5}$  м (подачу здійснювали кожні 10 хв – 0,02 й 0,05 мм/10 хв), частоти кругової подачі  $\omega_3$  – 18,3 і 28,8 рад/с ( $n_3 = 175$  й 275 об/хв), частоти обертання круга  $\omega_k$  – 104,7 і 167,6 рад/с ( $n_k = 1000$  й 1600 об/хв). Час проведення кожного дослідів – 30 хв.

В результаті дослідження впливу технологічних режимів шліфування керамічних шариків із нітриду кремнію на зношування алмазно-абразивного круга отримано закономірності змінювання профілю робочої поверхні круга як у вигляді сукупності експериментальних точок  $y_{mi}$  для реперних значень радіуса  $r$ , так і у вигляді функцій  $y_r = f(r)$  як результату апроксимації вказаної сукупності точок функцією квадратичної регресії за допомогою [3] (рис. 2).

Встановлено, що якщо зношування алмазно-абразивного круга під час шліфування керамічних шариків у кільцевій канавці оцінювати розмахом змінювання координат профілю ( $y_{\max} - y_{\min}$ ), то цей показник коливається по ходу проведення дослідів в межах 62–152 мкм (рис. 2). Найбільш сприятливим для зниження розмаху ( $y_{\max} - y_{\min}$ ) за результатами проведених дослідів є співвідношення режимних параметрів  $s_b:\omega_3:\omega_k = 0,03:275:1600$ , а на підґрунті отриманих лінійних моделей  $\lambda$  і  $k_p$  подальше зменшення розмаху слід очікувати за умови обрання певного значення частоти подачі заготовок  $\omega_3$ . Аналогічні



розрахунки, проведені нами [4], показують, що за схеми шліфування шариків з круговою подачею розмах ( $y_{\max} - y_{\min}$ ) коливається в межах 158–202 мкм, а найбільш сприятливим для його зниження є співвідношення режимних параметрів  $s_g:\omega_3:\omega_k = (0,03-0,06):275:1000$ . Подальше зменшення розмаху слід очікувати за умови виходу параметру  $\omega_3$  за межі дослідженого діапазону.



**Рис. 2 – Змінювання положення експериментального й апроксимованого початкового профілю й після проведення дослідів 1–8 у залежності від радіуса  $r$  поверхні круга:**  
 3 ( $\triangle$ ), 4 ( $\diamond$ ), 7 ( $\square$ ), 8 ( $\circ$ ), 5 ( $\blacklozenge$ ), 6 ( $\blacktriangle$ ), 1 ( $\blacksquare$ ), 2 ( $\bullet$ )

На відміну від суцільно від’ємних значень кута нахилу  $\lambda$ , обумовлених обраною в [4] схемою шліфування шариків на площині, до схеми шліфування у канавці маємо тенденцію до поступового переходу від від’ємних значень до додатних. Розрахунки, проведені на підґрунті отриманої лінійної моделі  $\lambda$ , показують [4], що зменшення кута нахилу  $\lambda$  до значень поблизу нуля слід очікувати за умови обрання частоти подачі заготовок на рівні  $\omega_3 \approx 23,4$  рад/с: (для порівняння, за схеми шліфування шариків на площині [4] зниження  $\lambda$  до рівня 0,2 рад досягли пониженням  $\omega_3$  до мінімуму в межах дослідженого діапазону). Розрахунки, проведені на підґрунті отриманої лінійної моделі  $k_p$ , показують, що досягнення коефіцієнтом кривизни  $k_p$  значень поблизу нуля слід очікувати за умови ви-

ходу параметру  $\omega_3$  за межі дослідженого діапазону, а саме: підвищенням його значення до  $\omega_3 \approx 30,9$  рад/с. Отже на підґрунті проведених розрахунків для схеми шліфування шариків у кільцевій канавці повного вирівнювання зношування шліфувального круга по профілю слід очікувати за умови обрання  $\omega_3$  на рівні 23,4 рад/с ( $\approx 223,5$  об/хв). За такого значення  $\omega_3$  кут нахилу складе  $\lambda \approx 10'$ .

В результаті виконаного експериментального дослідження впливу режиму алмазно-абразивного шліфування керамічних шариків з нітриду кремнію у круговій канавці на зношування поверхні алмазного круга встановлено, що технологічні ефекти, які спостерігалися під час варіювання факторами режиму обробки, можуть бути адекватно описані лінійними функціями обраних показників процесу від режиму обробки: кута нахилу профілю круга, коефіцієнту кривизни профілю – від частоти подачі заготовок. Це дозволяє визначати комбінації факторів режиму обробки у межах дослідженого діапазону змінювання, які є підґрунтям для оптимізації значень вказаних показників.

### Література

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / под общ. ред. Н. В. Новикова. Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / под. ред. А. А. Шепелева. – Киев : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины; ИВЦ АЛКОН НАН Украины, 2007. – 340 с.
2. Кононюк, А. Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента) / А. Е. Кононюк. В 4-х т. – Киев, Изд-во КНТ, 2011. – Т. 2. – 453 с.
3. Xiao, X.L. Polishing of Silicon Nitride Ceramic Balls by Clustered Magnetorheological Finish / X. L. Xiao, G. X. Li, H. J. Mei, Q. S. Yan, H. T. Lin, F. L. Zhang // *Micromachines*. – 2020. – 11. – 304.
4. Сохань, С. В. Алмазне шліфування керамічних куль з круговою подачею / С. В. Сохань, В. В. Возний, В. Г. Сороченко, М. П. Гаманюк // *Надтв. матеріали*. – 2023. – Вип. №4.

## **СУЧАСНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МІКРОВИРОБНИЦТВА**

Нині в усьому світі, як у науково-дослідних установах так і в промисловості, є великий інтерес до галузі мікровиробництва. Сьогодні мікровиробництво інтенсивно розвивається як відповідь на підвищений попит щодо мініатюрної продукції, яка виготовляється часто в невеликих кількостях, може мати складну форму з особливими вимогами до якості поверхні. Багато продуктів промисловості вимагають виготовлення мініатюрних компонентів, що супроводжується зниженням споживання енергії та витрат матеріалів, використанням у виробництві, спрощенням обробних систем, збільшенням швидкостей, чутливості та селективності систем, необхідністю використання у технологіях нових ефектів тощо.

Механічні мікрооброблювальні процеси, в основному, модифіковані або прості конвенційні макро-механічні оброблювальні процеси, не пов'язані з розмірами виробів. У світі докладаються великі зусилля з дослідження і створення машин мікро/мезо-розмірів. Таким машинам притаманні певні проблеми: – складність в управлінні по осях; – велика рухома маса; – значні прискорення; – необхідність ультравеликих чисел обертів шпинделя; – неточність мікро-інструментів; – низька точність виробів, що виготовляються. Зазначене може бути частково вирішено за рахунок зменшення пересувних мас, розвитку алгоритмів управління, створення контрольної стратегії досягнення необхідної топографії поверхні, введення активної компенсації в обробні системи.

Мікро-EDM процеси – безконтактні процеси, засновані на виникненні дуги або іскри між електродами (інструментом і деталлю), завдяки яким виникає частковий місцевий нагрів і плавлення оброблюваного матеріалу. Є варіанти мікро-EDM з використанням електродів і дроту. Для таких процесів характерно: – втрата точності, що потребує розвитку та використання стратегії компенсації зносу електрода; – пошкодження обробленої поверхні за рахунок теплового впливу на мікрорівні.

Мікро-інкрементальне формування (IF) – техніка формування металевого листа, яку виконує рухомий універсальний інструмент – формувальний елемент, що рухається, і переміщується за заздалегідь визначеною орбітою, приводячи до часткової деформації листа до

необхідної форми. Ця технологія реалізується без виготовлення інструменту необхідної форми і дає змогу досягти кращих властивостей матеріалу, як порівняти з традиційним формуванням.

Мікро-штампівка – високопродуктивний процес з великим ступенем використання матеріалу, відносно простий варіант для масового виробництва мікроструктурних компонентів з розміром  $< 1$  мм.

Мікро-екструзія – високопродуктивний процес з великим ступенем використання матеріалу, так само як і мікроштампування, є відносно простим варіантом для масового виробництва мікроструктурних компонентів розмірів  $< 1$  мм.

Завдяки актуальному тренду мініатюризації в даний час має місце інтенсивний попит на енергетично ефективні мініатюрні компоненти. Представлені приклади деяких напрямів досліджень розвитку нових методів обробки та мікро-машин для обробки широкої гама деталей з металів, полімерів, кераміки та ін.

Обробні системи нового покоління – основа розвитку виробничих технологій у всіх галузях промисловості. На Машинобудівному факультеті Белградського університету проводять дослідження у галузі устаткування нового покоління, створення обробних систем для багатовісового оброблення, вдосконалення і застосування керованих систем, випробування обробних систем у виробничих умовах.

*Тимофєєв С.С., Козловська І.П, Печериця В.Р.,  
Артеменко Д.П. Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків, Україна*

## **ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

Ефективним способом підвищення якості та експлуатаційних властивостей поверхонь циліндро-поршневої групи є використання сталі 38Х2МЮА та легованих чавунів, а потім їх зміцнення різними технологічними методами. Існуючі технології недостатньо і не завжди забезпечують стабільну роботу пар тертя гільза циліндра–поршневе кільце. Тому вдосконалення технології виготовлення та ремонт деталей циліндро-поршневої групи, для забезпечення високої якості їх робочих поверхонь та підвищення експлуатаційних

властивостей, є актуальним науковим завданням, яке має важливе практичне значення.

Статистичний аналіз показує, що більшість пар тертя виходять з ладу через їх знос. Серед таких пар домінують деталі циліндро-поршневої групи дизельних двигунів. Підвищення їх працездатності є дуже важливим завданням. Збої в роботі двигуна, пов'язані зі зносом його деталей, вимагають значних витрат на заміну запасних частин, а також збільшують витрати на обслуговування та експлуатацію.

Дослідження процесу зносу циліндрів двигунів внутрішнього згоряння показало, що руйнування робочої поверхні стінок циліндрів відбувається через збільшення вмісту в них оксикарбонітридів, що утворюються при фазових перетвореннях металу під дією високої температури, пластичних деформацій і дифузії. Для усунення таких ефектів необхідно, щоб термомеханохімічні реакції, що відбуваються на поверхні деталі, регенерували її поверхневий шар, без утворення структур, які відрізняються від початкових. Це означає, що вторинні структури, які утворюються в процесі тертя, повинні відповідати первинному хімічному складу. Для досягнення цієї мети були проведені випробування деталей, що працюють в умовах тертя та зношування. Деталі оброблялися у відомих насичених середовищах та нових з використанням солей амонію, а потім визначали їх експлуатаційні властивості. Деталі випробовували на стійкість до задирів, теплостійкість основи, зносостійкість і визначали час роботи.

Порівняння показників свідчить, що поверхневий шар, утворений у насиченому середовищі перегрітої пари водного розчину солей амонію і має шарувату структуру, підвищує термостійкість виробів та їх термін служби в 1,6 разів, а також скорочує час припрацювання. Ці дослідження підтверджуються результатами проведених вимірювань деталі. Проведені випробування показали, що, незважаючи на термомеханохімічні реакції, що відбуваються на поверхні деталі, отриманий шар не зруйнувався.

Відомо, що багато гільз циліндрів виготовляються не тільки зі сталі, але й з чавуну. Тому з метою поліпшення антифрикційних властивостей поверхні чавунних гільз були проведені випробування, в яких для чавунних гільз пропонується використовувати водний 20% розчин тіосульфату як насичуюче середовище. Поверхневий шар, отриманий в процесі насичення, містить такі хімічні елементи як кисень, залізо, сірка та вуглець.

Проведені дослідження, структури отриманого шару, виявили, що утворений шар складається з різних фаз. Ці фази в поверхнево-му шарі мають значний вплив на зносостійкість і антифрикційні властивості залізобуглецевих сплавів, а саме на поліпшення припрацювання, зниження коефіцієнту тертя. Дослідження експлуатаційних властивостей деталей, оброблених у нових насичених середовищах, показали, що застосування солей амонію в обробці гільз зі сталі 38Х2МЮА та використання водного 20% розчину тіосульфату для чавунних гільз підвищує їх антифрикційні властивості, а також збільшує термін служби деталей. У новому насичуючому середовищі деталі обробляються в 1,5 разів швидше, ніж деталі з шарами, що містять оксиди заліза і пройшли хіміко-термічну обробку в відомих насичуючих середовищах. Антифрикційні властивості отриманого шару також покращуються в 1,7–2,0 рази, що свідчить про зниження коефіцієнту тертя.

*Тимофеева Л.А., Баглай О.П., Назаренко М.Р.*  
Український державний університет залізничного  
транспорту, Харків, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

На теперішній час важливе значення має надійність металоконструкцій, що виготовляються зварюванням. Особливе значення мають металоконструкції для зерносковищ, навіси для автопаркінгу та навіси для домашнього домогосподарства, торгівлі павільйони, сховища для овочів та фруктів, спортивні споруди, будівлі для авто послуг, навіси для терас, огорожувальні елементи, каркасні будинки. Ці конструкції повинні витримувати снігове навантаження та вітрове.

Снігове навантаження – це навантаження яке сприймає конструкція ангару на себе від маси снігу який лежить на ангарі. Відповідно вітрове навантаження – це навантаження яке сприймає конструкція від пориву вітру, який впливає на ангар.

Снігові та вітрові навантаження регламентуються «Державними будівельними нормами України» (далі ДСП). Відповідно до цих ДСП в Україні існує 6 снігових регіонів та 5 вітрових. У кожному регіоні діють свої значення снігових та вітрових навантажень. Всі

ці значення зведені до загальної таблиці. Для того, щоб можна було визначити в якій сніговій зоні розташована конструкція - достатньо подивитися по карті, де знаходиться населений пункт. Краще робити розрахунки із запасом. Якщо межа 4 та 5 регіону, і є сумніви – обираємо 5 сніговий регіон, щоб 100% будівля не впала. Максимальне снігове навантаження у Сумській та Чернігівській областях – це  $180 \text{ кг/м}^2$ . Таким чином, якщо покрівля приблизно  $1000 \text{ м}^2$  та випадє максимальна кількість снігу, то взимку на даху може лежати 180 тонн снігу. Звісно, не кожної зими випадє така кількість снігу, але така можливість існує. І якщо конструкція була запроектована без урахування снігових та вітрових навантажень або були закладені менші снігові та вітрові навантаження через незнання, помилково або з іншої причини, підвищується ймовірність, що цей сніг опиниться всередині ангару. Ангар може зруйнуватися, деформуватись, і тоді майно, товар, техніка можуть постраждати.

У разі обвалення виникнуть великі витрати на відновлення ангару, а також майна, техніки та всього іншого, що в ньому знаходилося.

У більшості випадків деформація та руйнування ангару відбуваються через те, що конструкції виготовляються без урахування того, які снігові та вітрові навантаження діятимуть на ангар.

Матеріали що використовуються для виготовлення таких конструкцій - це низьковуглецеві сталі. Тому важливе значення має технологія зварювання та контроль зварювальних швів, а також проведення лабораторних та експлуатаційних досліджень. Ці дослідження необхідно проводити з урахуванням навантаження по кожному регіону, їх на теперішній час в Україні – шість.

Аналіз навантаження по кожному із регіонів України. Максимальний сніговий регіон – 6. Тут навантаження від  $160$  до  $180 \text{ кг/м}^2$ . До цього снігового регіону належать такі міста, як Суми та Чернігів.

П'ятий сніговий регіон – це  $140$ – $160 \text{ кг/м}^2$ . До цього снігового регіону належать: Київ, Полтава, Харків, Івано-Франківськ.

До четвертого снігового регіону, це  $120$ – $140 \text{ кг/м}^2$ , належать: Кременчук, Дніпро, Кропивницький, Вінниця та вся Західна Україна (Львів, Тернопіль, Хмельницький, Рівне, Луцьк).

Третій сніговий регіон – це навантаження до  $100$ – $120 \text{ кг/м}^2$ . (Запоріжжя).

Другий сніговий регіон з навантаженням від  $80$  до  $100 \text{ кг/м}^2$  (Одеса та Миколаїв).

Перший сніговий регіон – це навантаження до  $80 \text{ кг/м}^2$  (Херсон).

Отже, оскільки снігові та вітрові навантаження суттєво відрізняються в залежності від регіону встановлення та експлуатації конструкцій, необхідно при виготовленні металоконструкцій враховувати норми навантаження на кожен регіон, забезпечувати та підвищувати контроль якості зварювальних швів.

*Чичин Є.В., Федченко І.І. Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна*

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ**

Вдосконалення методів калібрування вимірювальних приладів – невід’ємна складова сучасної вимірювальної техніки. На цей час, коли точність вимірювань має велике значення, створення та удосконалення таких методів є актуальним завданням.

У світі, високотехнологічні вимірювальні прилади є невід’ємною частиною різних галузей промисловості, науки і медицини. Забезпечення їх точності та надійності важливе для успішного функціонування процесів та отримання достовірних даних. У контексті технологій, що стрімко розвиваються, і вимог до високої точності вимірювань, стає критично важливим розвиток нових методів калібрування для сучасних високотехнологічних вимірювальних приладів.

Розглянемо сучасні та ефективні методи калібрування для забезпечення високої точності та достовірності результатів вимірювань:

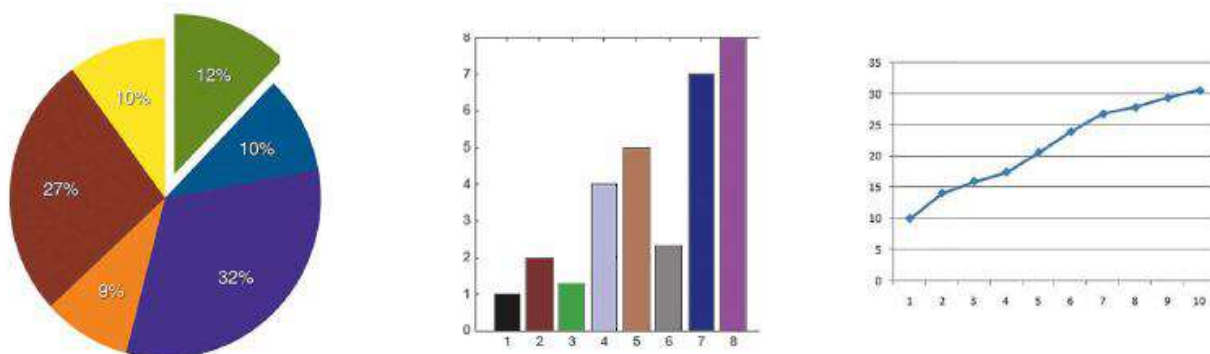
Калібрування за допомогою стандартних зразків: В цьому методі порівнюють результати вимірювань пристрою з відомими значеннями стандартних зразків. Наприклад, калібрування термометра може виконуватися порівнянням його вимірювань з температурою відомих точок кипіння та кристалізації води.

Метод перехресного калібрування: Використовується для калібрування багатьох пристроїв одночасно, де кожен пристрій використовується для калібрування іншого. Наприклад, це може бути застосовано для калібрування різних термометрів між собою.

Калібрування за допомогою математичних моделей (рис. 1): Цей метод полягає у використанні математичних алгоритмів для коригу-



вання результатів вимірювань. Наприклад, лінійна апроксимація може використовуватися для коригування нелінійних вимірювань.



**Рис. 1 – Приклади використання математичних алгоритмів**

Калібрування за допомогою контрольних зразків: В цьому методі контрольні зразки імітують реальні умови вимірювань, і пристрій калібрується на основі вимірювань цих зразків. Наприклад, калібрування фотоапарата може виконуватися на основі фотографій контрольних карток.

Калібрування з використанням програмного забезпечення: Цей метод використовує комп'ютерні програми для автоматизації процесу калібрування та аналізу результатів. Наприклад, програмне забезпечення може здійснювати автоматичну корекцію вимірювань засобів вимірювання.

Основна мета удосконалення методів калібрування полягає в забезпеченні високої точності та надійності вимірювань, а також уникненні можливих помилок. Це досягається за допомогою застосування нових технологій та удосконалення існуючих методів.

У підсумку, розробка та удосконалення методів калібрування вимірювальних приладів є важливим напрямком досліджень, спрямованих на підвищення точності та надійності вимірювань в різних галузях. Це відкриває нові можливості для подальшого розвитку вимірювальної техніки з метою відповіді на потреби суспільства.

### **Література**

1. ДСТУ ISO 10012:2005 "Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання".
2. ДСТУ EN 61010-1:2014 "Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. Загальні вимоги".
3. ДСТУ EN ISO 9001:2015 "Системи управління якістю. Вимоги".
4. Схеми: <https://ua.izzi.digital/DOS/373183/408448.html>

*Яценко І.В., Ващенко В.А., Колінько С.О.,  
Бутенко Т.І., Мартиненко Н.В.* Черкаський  
державний технологічний університет, Черкаси, Україна

## **ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ТЕРМОВПЛИВІВ НА ПОВЕРХНЮ ВИРОБІВ З ОПТИЧНИХ КЕРАМІК ПРИ ЇХНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Для підвищення надійності роботи виробів в екстремальних зовнішніх умовах розроблений і успішно використовується метод термозміцнювальної поверхневої обробки оптичної кераміки електронними потоками стрічкової форми. Для підвищення ефективності, зниження трудомісткості та підвищення економічності зазначеного методу потрібно визначати найнебезпечніші ділянки через розрахунок розподілу теплового потоку з прилежового шару уздовж поверхні виробу, що обдувається, а також оцінювати максимальні теплові навантаження й термічні напруження по глибині виробу залежно від динамічних режимів його експлуатації.

Виходячи з досліджень процесу нагріву різних виробів в умовах їхнього польоту показано, що кінетичний нагрів поверхні виробів здійснюється в результаті надзвукового обдуву потоком повітря. При цьому розподіл теплового потоку (або коефіцієнта теплопередачі) з прикордонного шару вздовж поверхні виробу найбільш суттєво залежить від режиму обтікання виробу повітряним потоком (ламінарний або турбулентний режим), на реалізацію якого чинить вплив висота та швидкість польоту виробів, кути атаки та ковзання, а також стан навколишнього середовища.

Так, при ламінарному режимі обтікання виробів в залежності від значень кутів атаки та ковзання розподіл теплового потоку (коефіцієнта теплопередачі) по поверхні виробів може суттєво змінюватися: мати максимум тільки у критичній точці ( $\alpha = 0, \gamma = 0$ ) або мати складний просторовий розподіл ( $\alpha \neq 0, \gamma \neq 0$ ). Що стосується турбулентного режиму обтікання виробів, то в цьому випадку внаслідок суттєвого ускладнення загальної гідродинамічної картини течії навіть при нульових кутах атаки та ковзання максимум теплового потоку помітно зміщується з критичної точки вздовж контура до задньої кромки. При цьому, у порівнянні з ламінарним режимом обтікання суттєво зростають дотичні напруження, максимум яких припадає на зони максимального значення теплового потоку. Най-

більш сприятливими з точки зору впорядкування розподілу теплового потоку по поверхні виробу є ламінарний та турбулентний режими обтікання при нульових кутах атаки та ковзання, які можна реалізувати за допомогою завдання режимів польоту (законів зміни швидкості польоту на різних висотах).

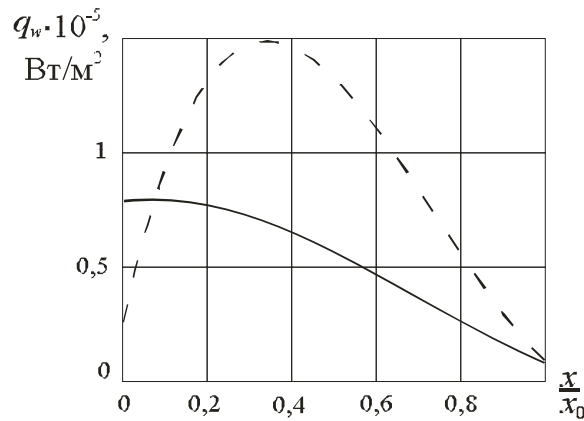
Визначено, що для досліджуваних розмірів виробу при надзвуківому обдуві його зі швидкостями  $M$  ( $M > 2,5-3,0$ ) реалізується по всій її довжині, в основному, турбулентний режим обтікання, тому що значення критерію Рейнольдса в цьому випадку  $Re > 10^5$ ; ламінарний режим реалізується тільки у окремих випадках (при невеликих довжинах пластини й помірних швидкостях обдуву (значення  $Re < 10^5$ )).

Однак, нині відсутня закінчена теорія турбулентного теплообміну, тому замість розв'язання класичної контактної задачі аеродинамічного нагріву розглядуваних виробів використовується напівемпіричний підхід, похибка якого, як показують існуючі застосування цього підходу, лежить у межах 15–20 %.

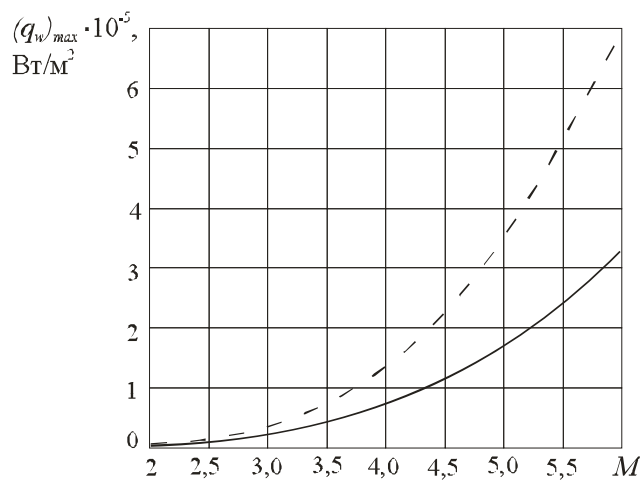
На першому етапі розв'язується зовнішня газодинамічна задача обтікання на базі експериментальних даних продувки тіл різної геометричної форми (плоскі й вісесиметричні тіла) в аеродинамічних трубах знаходимо тепловий потік  $q_w$  з прикордонного шару, що залежить від швидкості польоту виробу, режиму обтікання (ламінарний, турбулентний) і змінюється уздовж обтічної поверхні.

На другому етапі розв'язується внутрішня задача нагрівання виробу товщини  $H$  при заданому зовнішньому тепловому потоці  $q_w$ .

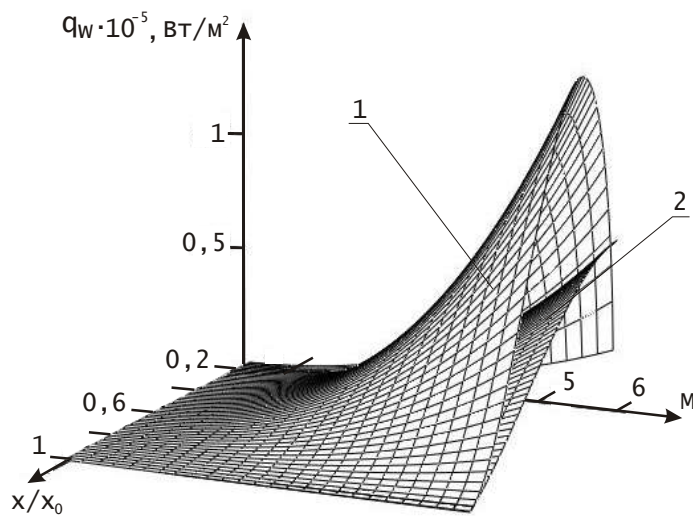
З результатів розрахунків, поданих на рис. 1–3, випливає, що місце розташування максимальних значень теплового потоку  $(q_w)_{\max}$  на поверхні пластини залежить від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення  $(q_w)_{\max}$  перебувають поблизу передньої критичної точки ( $x = 0$ ) пластини; для турбулентного режиму обтікання значення  $(q_w)_{\max}$  уже зміщаються від  $x = 0$  до  $x_{\max}$ . При цьому зі збільшенням швидкості обдуву потоком повітря від  $M = 2$  до  $M = 6$  значення  $(q_w)_{\max}$  зростають від  $0,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> до  $7 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (турбулентний режим обтікання) і від  $0,2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> до  $3,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (ламінарний режим обтікання). Щодо значень  $x_{\max}$ , то для ламінарного режиму обтікання  $x_{\max} \approx 0$  не залежить від  $M$ . При турбулентному режимі обтікання (для дослідженого діапазону зміни  $M = 2-6$ )  $x_{\max}$  лежить у межах  $(0,38-0,43) \cdot x_0$  (наприклад, для  $x_0 = 0,1$  м  $x_{\max} = 0,038-0,043$  м), тобто практично не змінюється, що повністю відповідає отриманим експериментальним значенням.



**Рис. 1 – Розподіл теплового потоку  $q_w$  уздовж поверхні пластини при надзвуковому обдуві потоком повітря виробу ( $T_0 = 300$  К;  $x_0 = 0,1$  м;  $M = 3$ ):**  
 --- турбулентний режим обтікання; ——— ламінарний режим обтікання



**Рис. 2 – Залежність максимальних значень теплового потоку  $(q_w)_{\max}$  від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря пластини ( $T_0 = 300$  К;  $x_0 = 0,1$  м):**  
 --- турбулентний режим обтікання; ——— ламінарний режим



**Рис. 3 – Тривимірне зображення розподілу теплового потоку  $(q_w)_{\max}$  на поверхні пластини, обтічної надзвуковим потоком повітря ( $T_0 = 300$  К;  $x_0 = 0,1$  м):** 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим

*Голякевич А.А., Лавров О.С., Семенівський К.В.*  
ТОВ «ТМ.Велтек», Київ  
*Євдокимов А.В.* ТОВ «Steel Work», Кривий Ріг  
*Деркач О.Д.* Дніпровський державний  
аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

## **ПОРОШКОВІ ДРОТИ З РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ЛЕГУВАННЯ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ТВЕРДІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ МЕТАЛУ В МЕЖАХ 58–65 HRC**

Підвищення ресурсу робочих органів обладнання, що працює в умовах інтенсивного зносу, є одним з найважливіших завдань при ремонті в різних галузях промисловості: сільськогосподарському машинобудуванні, гірничо-вугледобувній, цементній та багатьох інших.

Одним з найбільш ефективних методів є електродугове зміцнююче наплавлення порошковими дротами. До переваг цього методу можна віднести можливість досягати необхідного складу наплавленого металу, що забезпечує його високу твердість, за рахунок введення до складу дроту різних легуючих компонентів (феросплавів, комплексних лігатур, модифікаторів та інших).

Метою даної роботи було дослідження впливу різних систем легування порошкових дротів, що забезпечують твердість наплавленого металу 58–65 HRC, на його структуру (1-ша частина та його зносостійкість (2-га частина)

Зварювання проводилось напівавтоматом Fronius VR-3300 з джерелом живлення Vario Sinergic 5000 на режимах адаптованих для кожної марки дроту.

Хімічний склад наплавленого металу визначався за допомогою оптичного емісійного спектрометра «Spectrolab F». Металографічні дослідження проводились з застосуванням оптичного мікроскопа НЕОРНОТ 21 (табл. 1–3).

**Таблиця 1 – Система легування порошкових дротів**

Марка дроту	Система легування	Діапазон твердості, HRC
Велтек Н630-О	C-Cr-Si	60–64
Велтек Н620-О	C-Cr-Mo-Si-Mn-Ti	59–62
Велтек Н646-О	C-Cr-Nb-Mo-W-Si-Mn	59–64
Велтек Н590-О	C-Cr-Si-Mn	58–62
Велтек Н552-О	C-Cr-Nb-Si-Mn	60–62

**Таблиця 2 – Типовий хімічний склад наплавленого 3-го шару метала**

Марка дроту	C	Mn	Si	Cr	Ti	B	Nb	Mo
H630-O	~5,0	~0,2	~1,2	~27,0	–	–	–	–
H620-O	~1,0	~3,0	~3,0	~5,0	~1,0	–	–	~3,0
H646-O	~5,0	~1,0	~1,5	~20	–	–	~6,5	~5,5
H590-O	~0,5	~0,4	~3,0	~9,0	–	–	–	–
H552-O	~1,5	~1,2	~1,5	~5,0	–	–	~5,0	–

**Таблиця 3 – Типова мікроструктура верхнього (3-го) шару наплавленого металу**

Марка дроту	Короткий опис
Велтек H630-O	Мікроструктура складається із різноорієнтованих тригональних карбідів хрому, що розподілені по аустенітній основі, аустенітно-хромистокарбідної евтектики. Спостерігається частковий розпад аустеніту
Велтек H620-O	Мікроструктура металу складається з дендритів зі структурою мартенситу та залишкового аустеніту, аустенітно-карбідної евтектики, дрібних карбідів та дрібних нітридів титану
Велтек H646-O	Мікроструктура складається з різноорієнтованих тригональних карбідів хрому, розподілені по аустенітно-хромистокарбідній евтектиці, та, ймовірно дрібних карбідів ніобію
Велтек H590-O	Мікроструктура складається з дендритів зі структурою мартенситу, залишкового аустеніту, розташованого поміж дендритним простором, та ділянок з розірваними ланцюжками фази, що знаходиться по границям зерен
Велтек H552-O	Мікроструктура по перетину наплавленого металу складається з мартенситу, залишкового аустеніту, ділянок аустеніту та карбідів ніобію

*Петасюк Г.А., Лавріненко В.І., Полторацький В.Г.,  
Петасюк О.У.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ З МОРФОМЕТРИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МОДИФІКОВАНИХ ШЛІФПОРОШКІВ КВ 125/100**

Один із сучасних підходів до вирішення задачі підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту полягає в використанні у його робочому шарі шліфпорошків НТМ, модифікованих нанесенням покриттям [1].

У цієї роботі модифікування здійснювалось шляхом нанесення рідинно-фазовим способом на зерна шліфпорошку кубоніту КВ 125/100 багатокомпонентних покриттів. Для початкових та модифікованих шліфпорошків за допомогою приладу DiaInspect.OSM визначалися морфометричні характеристики : шорсткість проекції зерна ( $Rg$ ), питомий периметр проекції зерен ( $p_{пт}$ ), число зерен ( $N$ ) в одному караті, зовнішня питома поверхня ( $F_{пт}$ ,  $m^2/kg$ ), кількість ( $n_z$ ) і середнє значення кутів загострення різальних кромки ( $\phi$ ), однорідність шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен ( $u_{фпро}$ ). Значення перелічених характеристик модифікованих шліфпорошків подаються в табл. 1. За цими даними та густиною матеріалів покриття (склад наведений у табл. 1) і абразиву визначено ступінь покриття зерен покриттям та середня товщина покриття відповідно (табл. 1) [2, 3].

**Таблиця 1 – Значення морфометричних характеристик та технологічних властивостей модифікованих шліфпорошків кубічного нітриду бору КВ 125/100**

Складові покриття	$Rg$	$P_{пт}$ , мкм <sup>1</sup>	$F_{пт}$ , м <sup>2</sup> /кг	$u_{фпро}$	$h$ , мкм	$n_z \times N$ , шт.	$\phi$ , град.	Ступінь покриття, $\mu$ , %
$B_2O_3 + B_4C$	1,074	0,0283	19,94	57,56	1,000	501902	100,97	4,26
$B_2O_3 + TiO_2$	1,070	0,0299	17,56	56,47	4,940	445974	100,48	10,20
$B_2O_3 + CeO_2$	1,080	0,0311	18,60	67,13	2,950	460430	99,57	18,68
$B_2O_3 + SiC$	1,076	0,0319	17,91	61,48	3,203	471101	99,24	8,6
№135*, без покриття	1,0676	0,0322	17,40	62,26	—	463032	101,04	—

\* початковий шліфпорошок КВ 125/100

Модифіковані багатокомпонентними покриттями кубонітові шліфпорошки використані в робочому шарі шліфувальних кругів.

Випробування шліфувальних кругів проводилося при обробці швидкорізальної сталі марки Р6М5 (зразки 100×20×8 мм). Режими шліфування : швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,25 м/хв. (для продуктивності обробки  $Q = 50 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ), 0,50 м/хв. (для  $Q = 100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) та 1,00 м/хв (для  $Q = 200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ). Шліфування проводилося без охолодження. Результати визначення зносостійкості шліфувального інструменту за показником відносної витрати абразиву ( $q$ ) та за шорсткоті обробленої поверхні за показником ( $Ra$ ) наведено у табл. 2.

**Таблиця 2 – Відносні витрати абразиву ( $q$ ) шліфувальних кругів та шорсткості обробленої поверхні**

Складові покриття	$Q$					
	50		100		200	
	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм
$B_2O_3+B_4C$	0,73	0,25	1,27	0,57	1,48	0,63
$B_2O_3+TiO_2$	0,69	0,29	1,23	0,50	2,21	0,72
$B_2O_3+CeO_2$	1,12	0,32	1,53	0,50	2,91	0,70
$B_2O_3+SiC$	0,53	0,29	1,10	0,53	2,25	0,60
без покриття	1,07	0,30	1,36	0,49	2,22	0,47

Табл. 1 та 2 в подальшому переформатовувались у дві зведені таблиці (окремо для  $q$  і окремо для  $Ra$ ), які слугувала початковими даними для дослідження розглядуваного спрощеного кореляційного взаємозв'язку. Спрощення стосувалося того, що обчислювались і аналізувались лише коефіцієнти парної кореляції та коефіцієнт множинної кореляції. Цих двох статистичних параметрів достатньо для досягнення мети дослідження, яке проводилося. Крім того, розглядалися лише коефіцієнти парної кореляції залежних факторів із незалежними. Вони знаходяться у першому рядку відповідних матриць коефіцієнтів кореляції, а в силу симетрії цих матриць – також і в першій їх колонці. Для зручності подальшого викладу матеріалу вони подаються в окремій таблиці (табл. 3) для кожного із двох залежних факторів. Значення коефіцієнтів множинної кореляції виявилися такими:  $R_m = 0,884$  у випадку питомої витрати абразиву та  $R_m = 0,856$  у випадку шорсткості обробленої поверхні.



Таблиця 3 – Досліджувані коефіцієнти кореляції

Залежний фактор	Незалежні фактори							
	$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв.	$Rg$	$P_{\text{пр}}$ , мкм <sup>-1</sup>	$F_{\text{пр}}$ , м <sup>2</sup> /кг	$u_{\text{фпро}}$	$n_z \times N$ , шт.	$\varphi$ , град.	$h$ , мкм
$q$ , мг/Г	0,884	-0,280	0,268	-0,294	-0,018	0,278	-0,085	0,225
$Ra$ , мкм	0,856	-0,010	-0,120	0,051	-0,090	-0,011	-0,003	0,014

Порівняльний аналіз наведених у табл. 3 парних коефіцієнтів кореляції показує, що найбільший вплив на відносну витрату кубонітового шліфпорошку виявляють продуктивність обробки, шорсткість проекції зерен, питомий периметр проекції зерна, зовнішня питома поверхня, добуток середнього значення кількості кутів загострення різальних кромek на число зерен в одному караті та товщина покриття. У випадку шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  найбільший вплив на неї виявляють продуктивність обробки та питомий периметр проекції зерен. Значно менший коефіцієнт кореляції виявився між шорсткістю обробленої поверхні за параметром  $Ra$  та однорідністю шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен. Отримані значення коефіцієнтів множинної кореляції свідчать про наявність досить тісного взаємозв'язку [4] між відібраною для аналізу сукупністю незалежних факторів і кожним із залежних факторів, особливо це стосується питомої витрати абразиву.

Апроксимація експериментальних даних з найбільш впливових факторів, виконана за допомогою програмного комплексу LgAproх [5], дозволила отримати найбільш оптимальні за середнім значенням відносної похибки наступні залежності :

$$q = 1 / \left[ a_0 + \frac{a_1}{3 \lg Q} + a_2 (Rg)^3 + \frac{a_3}{(F_{\text{ю}})^3} \right] \quad (1)$$

де  $a_0 = -1,581$  г/мг,  $a_1 = 16,30475$  (г×мм<sup>3</sup>)/(мг·хв),  $a_2 = 0,07028$  г/мг,  $a_3 = -2783,561$  (г·м<sup>6</sup>)/(мг·кг<sup>3</sup>) (середнє значення відносної похибки відхилення розрахункових даних з відносної витрати рівне 14,15% із рівнозначною тенденцією як до завищення, так і до заниження результатів прогнозування (33,33%), максимальне відносної похибки відхилення склала 48,11%);

$$Ra = 1 / \left[ a_0 + \frac{a_1}{Q^2} + \frac{a_2}{Rg^2} + 3a_3 \lg(P_{\text{пр}}) + \frac{a_4}{3a_3 \lg(F_{\text{пр}})} + \frac{a_5}{h^2} + a_6(\varphi)^2 \right], \quad (2)$$

де  $a_0 = 29,302$  мкм<sup>-1</sup>,  $a_1 = 4949,32$  мм<sup>6</sup>/(мкм×хв<sup>2</sup>),  $a_2 = 180,996$  мкм<sup>-1</sup>,  $a_3 = 12,781$ ,  $a_4 = -436,402393$  м<sup>2</sup>/(кг·мкм),  $a_5 = -2,69039$  мкм<sup>-1</sup>,  $a_6 = -$

0,001066 (1/(мкм·град) (середнє значення відносної похибки відхилення розрахункових даних з шорсткості обробленої поверхні рівне 7,25% із тенденцією до збігу прогнозованих результатів із фактичними даними при допустимому значенні відхилення 10%, максимальне відхилення – 20,72%).

Проведений кількісний порівняльний аналіз показав, що залежність (2) дає кращі результати апроксимації, ніж залежність (1). Підвищення відтворювальної здатності залежності (1) можна досягти шляхом використання більшої кількості експериментальних даних, що планується виконати в подальшому.

Виконані дослідження дали можливість виявити морфометричні характеристики модифікованих абразивних порошоків, використаних у робочому шарі шліфувальних кругів, які є найбільш впливовими на ефективність такого інструменту. Це дозволило визначити напрямки вдосконалення технології нанесення покриття на зерна абразиву з метою забезпечення екстремальних значень саме цих характеристик модифікованих шліфпорошків кубічного нітриду бору.

Залежності (1), (2) дозволяють виконувати прогнозування можливих значень показників відносної витрати абразиву та шорсткості обробленої поверхні за параметрами процесу обробки та показниками морфометричних характеристик модифікованих шліфпорошків, використаних у робочому шарі абразивного інструменту.

## Література

1. Полторацький, В.Г. Порошки синтетичного алмазу з модифікованою термостійкими оксидами і хлоридами поверхнею зерен: отримання, властивості, застосування / В.Г. Полторацький, О.О. Бочечка, В.І. Лавріненко, Г.А. Петасюк, О.О. Пасічний, В.П. Білоченко // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – Київ : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 204–225.

2. Петасюк, Г.О. Пікнометрично-адитивний метод визначення ступеня покриття шліфпорошків надтвердих матеріалів з використанням екстраполяційно-афінної 3D-моделі зерна / Г.А. Петасюк, О.О. Бочечка, В.І. Лавріненко, В.Г. Полторацький, В.П. Білоченко, Д.В. Соколюк // Надтв. мат. – 2020. – № 3. – С. 94–99

3. Petasyuk, G.A. Determining the Thickness Coating of Grinding Powders of Synthetic Diamond Based on a Specific-Surface Approach

and using an Extrapolation-Affine 3D Model of Grain / G.A. Petasyuk / J. of Coat. Sci. and Technol. – 2022. – Vol. 9. – P. 20–25.

4. Перегуда, О.В. Статистична обробка даних : навч. посіб. / О. В. Перегуда, О.А. Капустян, О.Б. Крилко // Електронне видання, 2022. – 103 с.

5. Петасюк, Г.А. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LrArгох для применения в научно–прикладных задачах материаловедения / Г.А. Петасюк, О.У. Петасюк // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 58–63.

## ЗМІСТ

<i>Анісімов В.В., Анісімов В.М.</i> ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ З ДАТАСЕТОМ МАЛОГО РОЗМІРУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ЗОРУ В МАШИНОБУДУВАННІ	3
<i>Балицька Н.О., Москвін П.П., Крижанівський В.Б., Манохін А.С.</i> МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЗМОЧУВАННЯ ФРЕЗЕРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ НІТІНОЛУ	5
<i>Бахман С.О.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ ЦІЛЬНОКАТАНИХ КОЛІС ТА БАНДАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	7
<i>Буріков О.О., Майборода В.С.</i> Національний технічний університет Укра- їни "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ МАГНІТНИХ СИЛ , ЩО ВИНИКАЮТЬ В РОБОЧИХ ЗАЗОРАХ ГОЛОВОК ТОРЦЕВОГО ТИПУ НА БАЗІ ПОСТІЙНИХ ВИСОКО ПОТУЖНИХ МАГНІТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ІХ РОЗТАШУВАННЯ І КОНСТРУКЦІЇ	11
<i>Виноградова О.П., Васильчук О.С., Майстренко А.Л., Загора А.П., Ткач В.М., Білорусець В.В., Бологова Л.М.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТИНОК ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗОВМІСНОГО ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТА НА МІДНІЙ ЗВ'ЯЗЦІ ПРИ ЙОГО ВІДПРАЦЮВАННІ ПО ГІРСЬКІЙ ПОРОДІ	15
<i>Волошин Д.І., Плєскач І.І., Плєскач О.І.</i> ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ ПІДХОДІВ ДО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВАГОНОРЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВ	17
<i>Волошина Л.В., Сергєєв О.В., Бадяка К.М.</i> ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РАДІУСІВ: ІННОВАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ РАДІУСОМІРІВ	20
<i>Волошко О.В., Іваненко Р.О.</i> ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ	22

<i>Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В.</i> ПЕРСПЕКТИВА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКІСНОГО АБРАЗИВНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	24
<i>Гасанов М.І., Клочко О.О., Пермяков О.А., Рябченко С.В.</i> ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	26
<i>Геворкян Е.С., Мартиросян С.Р., Пліщенко П.В.</i> ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ FERROTITANITE-S	29
<i>Гопкало О.Є., Рутковський А.В., Антонюк В.С.</i> ВПЛИВ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ТА ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ 40ХН2МА	32
<i>Даниленко Ю.А., Грінченко Г.С.</i> МІЖНАРОДНИЙ КОМІТЕТ ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ІЕС SC 45А «АПАРАТУРА, КЕРУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК»	35
<i>Девін Л.М., Ричев С.В., Нечипоренко В.М., Грязев О.В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ НА СКЛАДОВІ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ШХ15 РІЗЦЕМ ІЗ РСВН КОМПОЗИТИВ	40
<i>Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Набока О.В., Степанова І.І., Храпов В.О., Рябченко С.В.</i> ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЕШЗ З МОДИФІКОВАНИМ ПРОФІЛЕМ	44
<i>Зяхор І.В., Левчук А.М., Шило Ю.А., Завертанний М.С., Кольцов В.В.</i> ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕХІДНИЙ ЕЛЕМЕНТ	47
<i>Ільницька Г.Д., Логінова О.Б., Лавріненко В.І., Смоквина В.В., Зайцева І.М., Котинська Л.Й., Тимошенко В.В.</i> ОТРИМАННЯ ЕЛІТНИХ ШЛІФПОРОШКІВ З СИНТЕТИЧНИХ АЛМАЗІВ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ	49

<i>Калініченко В.І., Катеринич С.Є., Магопець С.О., Шамрай В.Б.</i> ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ДЕТАЛІ ВУЗЛІВ І АГРЕГАТИВ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	52
<i>Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан., Кописькіна М.Ю., Мельнійчук Ю.О., Найденко А.Г.</i> ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ, ОСНАЩЕНИХ РсVN ГРУПІ ВН, VL, ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ	54
<i>Коваленко І.А.</i> ЛЕЗОВА ОБРОБКА ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ	58
<i>Коваленко Я.П.</i> ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВ Тi, Al та N РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ	61
<i>Ковальов В.Д., Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Бородай Р.А., Корчма Д.О.</i> КОНЦЕПЦІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВЕРСТАТИВ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРОННОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЯК МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ	62
<i>Комарова Г.Л., Кашипур А.П.</i> ІНТЕГРАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ ТА РОЗРОБКА НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ В ГАЛУЗІ БІОРОЗКЛАДНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ	65
<i>Комарова Г.Л., Лалазарова Н.О.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ ЗАЛІЗА З НАКЛАДАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ	69
<i>Куць Н.Г., Добровольська Л.Н.</i> ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ І АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	71
<i>Лаврінченко В.І., Скрыбін В.В., Полторацький В.Г., Петасюк Г.А., Солод В.Ю., Кашинський І.С., Гумаров О.В.</i> СУЧАСНІ РОЗРОБКИ В НАНЕСЕННІ ТА ЗАСТОСУВАННІ АНТИФРИКЦІЙНИХ ТА ЗАХИСНИХ БОР-НІТРИДНИХ ПОКРИТТІВ НА АБРАЗИВНІ ЗЕРНА ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ	73

<i>Лавріненко В.І., Шейко М.М., Максименко А.П., Рябченко С.В., Старик С.П., Білорусець В.В., Ситник Б.В., Полторацький В.Г.</i> АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ПОВЕРХНІ CVD-АЛМАЗУ: ВИХІДНОЇ ТА ПІСЛЯ АЛМАЗНОЇ ОБРОБКИ	77
<i>Леценко О.І.</i> ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ЗМІННОЇ КРИВИЗНИ ПРИ ЇХ ОБРОБЦІ З ІДЕНТИЧНИМИ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ	79
<i>Логінова Ю.В.</i> ТЕХНОЛОГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ВИРОБІВ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	82
<i>Лопата Л.А., Качинська І.Р., Солових Є.К.</i> ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗМІЦНЮЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ	86
<i>Лопата В.М., Солових А.Є., Лопата О.В.</i> ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ ДВИГУНІВ	89
<i>Людвіченко О.П., Лещук О.О., Гордєєв С.О., Петруша І.А.</i> ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЕПЛОВИЙ СТАН КОМІРКИ АВТ ТОРОЇДАЛЬНОГО ТИПУ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ GaN З РОЗЧИН-РОЗПЛАВНОЇ СИСТЕМИ Fe–Ga–N	92
<i>Майстренко А.Л., Заболотний С.Д., Нікітюк Ю.А., Старик С.П.</i> ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІЩУВАННЯМ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ТА УСУНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НА ЛИТИХ КОРПУСНИХ ВИРОБАХ З МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МЛ10	95
<i>Манохін А.С., Клименко С.А., Чумак А.О., Рижов Ю.Е.</i> ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ НА ПАРАМЕТРИ МЕХАНІКИ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ЗОНІ РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТОМ ІЗ PсVN	98
<i>Матвійчук О.О.</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ МЕЗОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ТА РЕМОНТІ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЮВАЧІВ ДВИГУНІВ АВІАЦІЙНИХ АГРЕГАТІВ	101
<i>Матошин О.В., Вислоух С.П.</i> МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ В КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ	105

<i>Мельник В.Є., Филь Р.С., Студенець С.Ф.</i> НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	108
<i>Молчанов В.Ф., Латішев Д.В.</i> ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ	110
<i>Ночвай В.М., Громовий О.А., Полонський Л.Г.</i> Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна МОДЕРНІЗАЦІЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕХАНІЗОВАНОГО НАПИЛЕННЯ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ПОКРИТТІВ	113
<i>Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Базалій Г.А., Косенчук Т.О.</i> ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ХІМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТА ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ	115
<i>Охріменко О.А., Шуплецов Д.К., Рябченко С.В., Шелковий О.М., Лук'яниця Я.Ю., Клочко Л.В., Гудименко О.М.</i> РЕМОНТНОПРИГОДНІСТЬ РЕДУКТОРІВ В ХЛІБОПЕКАРНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ	117
<i>Павлова Г.О.</i> ДОВЕДЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ В СУЧАСНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	118
<i>Пермяков О.А, Ткаченко Т.Ю., Яковенко І.Е.</i> РАЦІОНАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ ІНЖИНІРИНГУ В УМОВАХ ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА	119
<i>Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К., Будяк Р.В.</i> ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ГІЛЬЗ	121
<i>Радкевич С.І.</i> ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАВУНІВ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ	125
<i>Рукавішников П.В., Роценко О.В., Гарбуз О.С., Оразалієв В.В.</i> ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРІВ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ	127
<i>Рябченко С.В., Бандуренко М.В., Сільченко Я.Л., Федоренко В.Т.</i> ШЛІФУВАННЯ КОНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС КРУГАМИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ	129



<i>Рябченко С.В., Манохін А.С., Камчатна-Степанова К.В., Пермьков Є.О., Федоренко В.С.</i> УДОСКОНАЛЕННЯ НАРІЗАННЯ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ШЕВРОННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПІСЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ З ПРИПУСКОМ ПІД ЗУБОШЛІФУВАННЯ	131
<i>Сахнюк І.О., Рудак Н.П., Федосеєва І.К.</i> РОЛЬ МІЖНАРОДНИХ, ЄВРОПЕЙСЬКИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ ІЗ СТАНДАРТИЗАЦІЇ У ВІДБУДОВІ І «ЗЕЛЕНІЙ» РЕКОНСТРУКЦІЇ УКРАЇНИ	133
<i>Сергеев Д.М., Комарова Г.Л., Волошина Л.В.</i> АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	136
<i>Сергієнко І.А., Майборода В.С., Джулій Д.Ю.</i> ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СТРИЖНЕВОГО ЕЛЕМЕНТУ У ВАННІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ	139
<i>Скульський В.Ю., Прокоф'єв О.С., Губатюк Р.С., Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Гаврик А.Р., Абдулах В.М.</i> ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АКТИВУЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ТРУБ У ТРУБНИХ ДОШКАХ РЕКУПЕРАТОРІВ	142
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В.</i> ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ФОРМИ КЕРАМІЧНИХ ШАРИКІВ ПІДШИПНИКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	144
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В., Сороченко Т.А.</i> ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ ШАРИКІВ У КІЛЬЦЕВІЙ КАНАВЦІ НА ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО КРУГА	149
<i>Танович Л.</i> Белградський університет, Белград, Сербія СУЧАСНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МІКРОВИРОБНИЦТВ	154
<i>Тимофеев С.С., Козловська І.П., Печериця В.Р., Артеменко Д.П.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	155
<i>Тимофеева Л.А., Баглай О.П., Назаренко М.Р.</i> ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	157

- Чичин Є.В., Федченко І.І.*  
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ  
ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ 159
- Яценко І.В., Ващенко В.А., Колінько С.О., Бутенко Т.І., Мартиненко Н.В.*  
ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ  
ТЕРМОВПЛИВІВ НА ПОВЕРХНЮ ВИРОБІВ З ОПТИЧНИХ КЕРАМІК  
ПРИ ЇХНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ 161
- Голякевич А.А., Лавров О.С., Семенівський К.В., Євдокимов А.В.,  
Деркач О.Д.*  
ПОРОШКОВІ ДРОТИ З РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ЛЕГУВАННЯ, ЩО  
ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ТВЕРДІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ МЕТАЛУ В  
МЕЖАХ 58–65 HRC 164
- Петасюк Г.А., Лавріненко В.І., Полторацький В.Г., Петасюк О.У.*  
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ З МОРФОМЕТРИЧНИМИ ХАРАК-  
ТЕРИСТИКАМИ МОДИФІКОВАНИХ ШЛІФПОРОШКІВ КВ 125/100 166

# СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ І НА ТРАНСПОРТІ

Матеріали 24 Міжнародного науково-технічного семінару

*26–27 березня 2024 р.*

*Мови конференції: українська, англійська*

Комп'ютерна верстка  
Копейкіна М.Ю.

Підписано 20.03.2024  
Формат 60×84×1/16  
Умч. вид. арк. 14,6.

Асоціація технологів-машинобудівників України  
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2

Tel. +38044-4308500, +38050-3311922, +38050-3311923

[www.atmu.net.ua](http://www.atmu.net.ua)

E-mail: [atmu@ism.kiev.ua](mailto:atmu@ism.kiev.ua), [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua), [atmu1@meta.ua](mailto:atmu1@meta.ua)

---