



СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА І РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ ТА НА ТРАНСПОРТІ



Асоціація технологів-машинобудівників 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
26-го Міжнародного науково-технічного семінару**

31 березня–02 квітня 2026 р.

Київ – 2026

Житомир –  – 2026

Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 26 Міжнародного науково-технічного семінару, 31 березня–02 квітня 2026 р. – Київ: АТМ України; Житомир "Рута", 2026. – 154 с.

ISBN 978-617-581-713-1

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

ISBN 978-617-581-713-1

© АТМ України, 2026 р.

© ПП «Рута», 2026 р.

*Андреев І.В., Шеремет В.І., Шейкін С.Є.,
Студенець С.Ф., Клименко С.А.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОЛЬФРАМОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ КІНЕТИЧНИХ ПІНЕТРАТОРІВ

Спечені вольфрамові тверді сплави становлять основу сучасної інструментальної та машинобудівної промисловості як інструментальні та конструкційні матеріали завдяки їх унікальним властивостям (високими міцністю, твердістю, густиною і тощо). Також вольфрамові тверді сплави знаходять широке застосування і у продукції подвійного призначення в якості пробивного пінетратора перешкод. Зазвичай, в якості матеріалу для кінетичних пінетраторів застосовуються сплави із відносно невеликим вмістом цементуючої фази (до 10% мас) та розміром зерна карбідної фази до 1 мкм. Це дозволяє забезпечити досить високу твердість та міцність сплаву під час стискання. Проте, одержання сплавів із дрібнозернистою мікроструктурою є складнішим в порівнянні із виробництвом сплавів із класичною структурою (~ 2,5 мкм розмір зерна карбідної фази). Однією із основних проблем є необхідність тривалого розмелу, що вносить у сировину продукти намолу (матеріал розмельного обладнання) та необхідність контролю росту зерна карбідної фази під час рідкофазного спікання.

Одним із способів одержання дрібнозернистих твердих сплавів, який було розроблено в ІНМ НАН України, є одержання особливо дрібнозернистої вольфрамвмісної сировини методом суміщеного відновлення-вуглецювання оксидної суміші $WO_3 + Co_3O_4 + CoWO_4$, що дозволило уникнути тривалого розмелу та завдяки застосуванню інгібіторів росту зерна одержати сплави із розміром зерна карбідної фази менше 1 мкм та високими показниками фізико-механічних властивостей (границя міцності під час стискання 4800 МПа та твердість HRA 91) [1].

Також ефективним способом підвищення фізико-механічних характеристик твердих сплавів типу WC-Co є застосування холодного ізостатичного пресування (ХІП) [2]. Дослідженнями встановлено, що застосування ХІП для обробки сирові, спресованої одночасно за-

готовки дозволяє підвищити рівномірність розподілу сировини по об'єму пресовки (рис. 1), а також ініціює мартенситне фазове перетворення кристалічної ґратки кобальту та зміну кристалічної ґратки його значного об'єму із кубічної гранецентрованої на гексагонально щільно паковану. Відповідно, це дозволило суттєво підвищити експлуатаційні характеристики металообробного інструменту, як різального (рис. 2) так і деформувального (рис. 3).

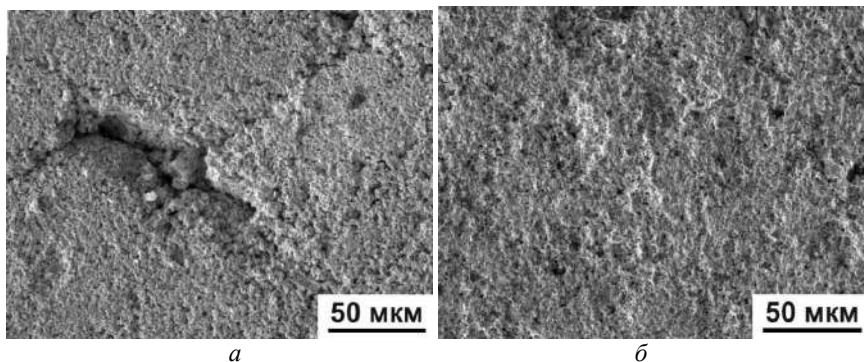


Рис. 1 – Поверхня твердосплавних виробів після ущільнення при компактуванні одновісним пресуванням (а) та після холодного ізостатичного пресування (б)

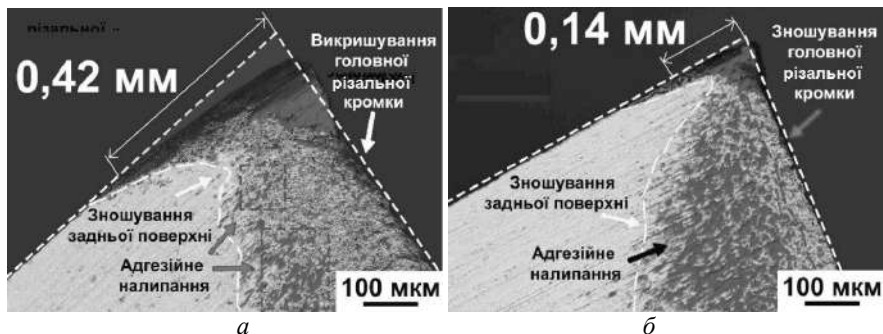


Рис. 2 – Зношування різальної кромки інструменту після точіння чавуну: сплав без додаткової обробки (а) та із застосуванням XIII (б)

Наведені приклади дозволяють прогнозувати, що XIII покращить ефективність роботи кінетичних пенетраторів, виготовлених з твердих сплавів завдяки підвищеному опору до руйнування. Поєднання таких способів, як: використання особливо дрібнозернистої вольфрамвмісної сировини, отриманої методом суміщеного

відновлення-вуглецювання оксидної суміші та застосування ХІП для обробки сирові, спресованої одновісно заготовки є надзвичайно перспективним. Тому, проведення комплексу відповідних досліджень у цьому напрямку є доцільним та актуальним.

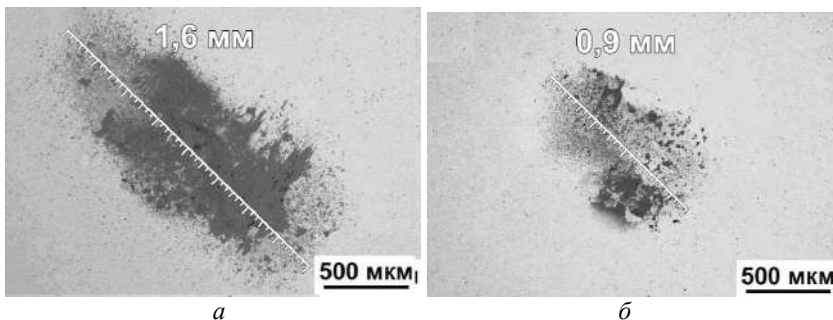


Рис. 3 – Зношені поверхні інструментів з твердого сплаву WC-15Co після виглажування сталі 45: без додаткової обробки (а) та із застосуванням ХІП (б)

Література

1. Андреев І. В. Вплив термічної обробки вихідної вольфрамвмісної сировини на структуру і властивості твердих сплавів типу WC-Co з особливо дрібнозернистою структурою // Сверхтвердые материалы. 2015. № 6. С. 70–75.
2. Акимов Г. Я., Андреев І. В., Лобода П. І. та ін. Вплив холодного ізостатичного пресування порошкових заготовок твердого сплаву BK8 на його твердість і фазовий склад після спікання // Порошкова металургія. 2021. № 3–4. С. 18–27.
3. Sheremet V., Akimov G., Andreiev I., Studenets S., Besarabets Y., Trosnikova I., Loboda P. Phase and microstructure formation in WC-Co cemented carbide tools via cold isostatic pressing // Results in Materials. 2026. Vol. 29. P. 1–12.

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК, ВИКОНАНИХ КОНТАКТНИМ СТИКОВИМ ЗВАРЮВАННЯМ ОПЛАВЛЕННЯМ

При спорудженні і ремонті залізничних колій в Україні переважно використовується контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО) [1, 2]. Для забезпечення стабільної якості зварних стиків необхідне суворе дотримання встановлених технологічних режимів КСЗО та ефективний контроль параметрів зварювання. Одним із сучасних рішень є використання систем дистанційного моніторингу процесу КСЗО рейок.

Такі системи дозволяють здійснювати безперервний збір, передачу та аналіз технологічних параметрів безпосередньо під час роботи рейкозварювальних машин, що підвищує надійність контролю якості стиків, забезпечує своєчасне виявлення відхилень від встановлених режимів і формування єдиної бази даних зварних з'єднань.

У процесі КСЗО контролюються основні параметри зварювання, регламентовані нормативними документами [3, 4]. Система контролю зварювальної машини автоматично реєструє ці параметри для кожного стика, формуючи його технологічний паспорт.

Зібрані дані з рейкозварювальних машин передаються на сервер централізованої інформаційної бази АТ «Укрзалізниця», звідки, спеціалістами ІЕЗ ім Є.О. Патона, за допомогою спеціально розроблених програм та систем, здійснюється їх подальша обробка та аналіз. На основі отриманої інформації проводиться оцінка відповідності фактичних параметрів зварювання встановленим технологічним вимогам і нормативним документам. У разі виявлення відхилень система може сигналізувати про потенційні ризики зниження якості стика, що дозволяє оперативнo реагувати на можливі порушення технології.

Мета дослідження – підвищення ефективності контролю якості стиків залізничних рейок, виконаних КСЗО, шляхом впровадження та використання системи дистанційного моніторингу технологічних параметрів та створення умов для своєчасного виявлення відхилень від встановлених технологічних вимог під час виконання зварювальних робіт на рейкозварювальних машинах.

Завдання дослідження:

- забезпечити збір та обробку даних щодо параметрів зварювання для кожного стика рейок, виконаного на рейкозварювальних машинах;
- розробити систему дистанційного моніторингу для реєстрації, передачі, накопичення та аналізу параметрів процесу КЗСО рейок;
- сформувані інформаційну базу даних зварних стиків для подальшого аналізу, статистичної обробки та вдосконалення технологічних режимів контактного стикового зварювання рейок.

Для обробки та аналізу протоколів зварних стиків рейок в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був створений програмний комплекс з використанням алгоритмів ШП, який був налаштований та випробуваний за даними зварювання більше 50 тис. стиків протягом 2024- 2025 років і виконує наступні функції:

1. Статистичний контроль для виявлення закономірностей за традиційними оцінками для кожного параметру процесу КЗСО [5].

2. Контроль відповідності процесу КЗСО технічним умовам на основі традиційного допускового контролю та нечіткої логічної моделі [6].

Аналіз функцій діючих систем керування показав, що для забезпечення необхідного функціоналу системи дистанційного моніторингу зварних стиків залізничних рейок, виконаних машинами для КЗСО на рейкозварювальних підприємствах (РЗП), потрібно зосередити увагу на таких напрямках:

- пошук нових параметрів керування й контролю з метою забезпечення стабільності режиму й, відповідно, якості зварювання;
- статистична обробка даних змінних рапортів зварювання стиків з кожною зварювальною машини для видачі рекомендацій і керуючих вказівок на рейкозварювальні підприємства.

У результаті була створена дворівнева система дистанційного моніторингу, що складається з двох взаємозв'язаних підсистем: локальної підсистеми керування, що встановлюється на кожній зварювальній машині (стаціонарній або підвісній), і підсистеми керування верхнього рівня, що поєднує та аналізує всі дані про зварний стик, а саме: назва РЗП, номер і тип зварювального комплексу, ПЗБ зварювальника в тому числі інформацію про місце укладання кожного стика [6]. Локальна підсистема здійснює пряме цифрове керування процесом зварювання, вимір параметрів процесу й перевірку їх на відповідність ТУ та формування й видачу протоколів зварювання.

Підсистема верхнього рівня виконує контроль якості зварних стиків по алгоритмах, які складно реалізувати в локальній підсистемі, статистичну обробку даних протоколів зварювання та формування рекомендацій з коригування режимів зварювання, технічному обслуговуванню зварювальних машин і коректуванню технологічного процесу в цілому.

У результаті була розроблена система дистанційного моніторингу зварних стиків залізничних рейок виконаних на рейкозварювальних машинах яка дала можливість:

- аналізу кожного зварного стика, виконаного на кожній рейкозварювальній машині, незалежно від місця проведення робіт.
- накопичення статистичних даних про параметри зварювання та результати контролю якості стиків, що дозволяє проводити аналітичний аналіз, спрямований на оптимізацію режимів зварювання;
- забезпечення оперативного контролю режимів зварювання безпосередньо під час виконання робіт;
- забезпечення своєчасного виявлення відхилень від встановлених технологічних параметрів та запобігання формуванню дефектних зварних з'єднань.

Висновки. Застосування систем дистанційного моніторингу процесу контактного стикового зварювання рейок оплавленням є важливим елементом сучасної системи забезпечення якості при виготовленні рейкових плітей безстикової колії. Реалізація такого підходу сприяє підвищенню достовірності контролю технологічних параметрів, забезпеченню стабільної якості зварних з'єднань та підвищенню рівня безпеки і надійності функціонування залізничної інфраструктури.

Література

1. Зяхор І. В., Антіпін Є. В., Дідковський О. В. та ін. Сучасні технології зварювання залізничних рейок (огляд) // Автоматичне зварювання. 2023. № 5. С. 5–17.

2. Зяхор І. В., Антіпін Є. В., Дідковський О. В. та ін. Актуальні проблеми зварювання залізничних рейок в Україні // Автоматичне зварювання. 2025. № 5. С. 31–47.

3. Рейки старопридатні. Ремонт і зварювання стиків в колії та поза межами колії. Технічні умови. ТУ УЗ 24.1-40075815-139:2025. Київ: Філія «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», 2025.

4. Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови. ТУ УЗ 24.1-40075815-002:2024. Київ: Філія «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», 2024.

5. StatSoft. Электронный учебник по статистике. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/> (дата звернення: 27.03.2026).

6. Кучук-Яценко С. І., Руденко П. М., Гавриш В. С., Дідковський О. В., Антіпін Є. В. Статистическое управление процессом контактной стыковой сварки рельсов. Двухуровневая система управления // Автоматическая сварка. 2016. № 5–6. С. 17–20.

Antonyuk V.S., Vislough S.P., Voloshko O.V.
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

TECHNOLOGICAL PARAMETERS RESEARCH OF MILLING ORGANOPLASTICS

Organoplastics belong to the class of modern composite materials, which are widely used in aviation, mechanical engineering, instrument-making and other industries due to their high specific strength, stiffness, corrosion resistance and low density. The use of organic high-strength fibers as a reinforcing component, in particular aramid, polyamide, polyester and polyolefin fibers, makes these materials promising for the manufacture of critical structures, especially in aircraft construction.

The main problem of organoplastics mechanical processing reinforced with aramid fibers of the SVM type is obtaining high quality of the processed surfaces.

At the same time, their mechanical processing is complicated by the anisotropy of the structure and the composition's heterogeneity, which leads to the surface defects formation such as delamination, fiber tearing, thermal damage to the matrix, low surface roughness, etc. [1].

Milling is one of the main technological methods for processing composite materials, which is mainly used for processing grooves, windows, and similar elements, so end mills are used for this purpose.

Technological methods of processing organoplastics, especially when milling them, require experimental research of the process, which will allow optimizing this type of mechanical processing with the optimal modes determination [2].

Experimental studies of organoplastic milling were performed on a vertical milling machine with CNC SMG-300. Standard end mills with a diameter of 20 mm made of high-speed steel P6M5 with a number of teeth $z = 5$ were used as cutting tools.

To measure the components of cutting forces, the workpiece was mounted on a four-component Kistler 9272 piezoelectric dynamometer, which in turn was fixed on the table of an CNC SMG-300 machine.

In samples from organoplastics of the SVM type grooves milling was performed in a wide range of cutting modes: cutting speed $V = 5\text{--}60$ m/min; feed per tooth $Sz = 0.01\text{--}0.5$ mm/tooth; cutting depth $t = 4\text{--}20$ mm. Cutting was performed without cooling.

The experimental results showed that increasing the feed per tooth leads to an increase in both components of the cutting forces. At the same time, the feed force P_x increases more intensively.

The effect of milling width on cutting force components can be taken into account by introducing correction factors.

Experimental studies have shown that increasing the cutting depth leads to an increase in the components of the cutting forces P_x and P_y , with the P_y force component growing more intensively.

The cutting speed effect on the cutting force components P_x and P_y was practically not detected, therefore experimental studies were conducted for the influencing factors – feed per cutter tooth and cutting depth.

The following analytical dependences of the cutting force components were obtained:

- $P_x = 210 + 4200Sz + 18,5t - 18000Sz^2 + 0,32t^2 + 120Sz \cdot t$, with coefficient of determination; $R^2 = 0,96$; standard deviation RMSE = 28;
- $P_y = -50 + 4300Sz + 20t - 14500Sz^2 - 0,3t^2 + 120Sz \cdot t$, with coefficient of determination $R^2 = 0,99$; standard deviation RMSE = 6,74.

At high cutting speeds, there is an abrupt increase of temperature in the cutting zone, which is accompanied by the presence of burns as a result of the burnout of the bond [3]

According to the results of experimental studies of the cutting forces of the organoplastics by SVM type milling process, it was established that when milling with standard end mills with a diameter of 20 mm made of high-speed steel P6M5 at the maximum cutting speeds $V = 60$ m/min without cooling, the feed per tooth $Sz = 0.09$ mm and the cutting depth $t = 20$ mm provide the highest process productivity with a milling cutter durability of 100–120 minutes and wear on the rear face of the milling cutters, which does not exceed 0.2 mm.

Literature

1. Lupkin B., Andrieiev O., Maiorova K., Antonyuk V., Vysloukh S. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 3, No. 1 (123). P. 59–67.
2. Matoshyn O., Vysloukh S., Antonyuk V., Voloshko O. Modeling and optimization of the process of drilling holes in carbon fiber reinforced polymer parts // Advanced Manufacturing Processes VI. 2024. P. 300–310.
3. Antonyuk V., Vysloukh S., Voloshko O. Research of the process of drilling holes in parts made of polymer carbon plastic // Cutting and Tools in Technological Systems. 2025. No. 103. P. 45–55.

Балицька Н.О. Державний університет
«Житомирська політехніка», Житомир

РЕЖИМ ЗМОЧУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВУ NITi, ТЕКСТУРОВАНИХ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯМ

Мікрофрезерування є перспективним методом текстурування поверхонь сплавів NiTi [1]. Мікрофрезерування забезпечує механічне видалення припуску із мінімізацією теплового впливу на поверхню, порівняно з іншими технологіями (наприклад, лазерна, електрохімічна, плазмова обробка та нанесення покриттів), що дозволяє зберігати властивості пам'яті форми та надпружності цього матеріалу. Переваги цього методу включають також гнучкість процесу та широку варіативність можливих геометрій текстур [2].

З метою дослідження режиму змочування текстурованих поверхонь сплаву Ni56,5Ti43,5 були проведені експериментальні дослідження. Мікрофрезерування текстур здійснювалося на обробному центрі мод. DMU 65 FDS monoblock твердосплавними мікрофрезами GARANT Master Titan з покриттям TiAlN діаметрами 0,2, 0,5 та 1 мм із охолодженням повітрям. Формувалися текстури у вигляді прямолінійних прямокутних мікропазів, квадратних мікростовпчиків та циліндричних мікроямок.

Статичні видимі кути змочування визначали методом сидячої краплі за допомогою оптичного гоніометра (BGD-190, Bigued Precision Instruments). Встановлено, що видимий кут змочування во-

дою текстурованих поверхонь змінювався в діапазоні $50\text{--}98,6^\circ$ (рис. 1). При цьому всі досліджувані поверхні перебували у стані Венцеля.

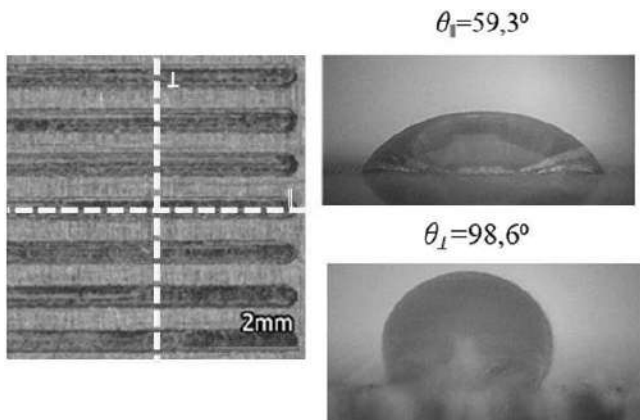


Рис. 1 – Видимі кути змочування водою текстурованої поверхні з прямокутними прямолінійними пазами ($0,5 \times 0,5 \times 0,1$ мм)

Спостерігався стрибкоподібний рух краплі по текстурованих поверхнях. За допомогою модифікованого методу сидячої краплі [3] було визначено динамічні кути змочування. Момент руху краплі, спричинений збільшенням її об'єму, фіксувався цифровою камерою мод. UCMOS 1300 (Sigeta). Рух краплі аналізувався кадр за кадром, при цьому фіксувалися найбільші значення кутів натікання (рис. 2) та найменші значення кутів відтікання.

У цілому для всіх дослідних зразків кут натікання варіювався в діапазоні $75\text{--}164^\circ$, тоді як кут відтікання становив $18\text{--}36^\circ$, що відповідало гістерезису змочування $51\text{--}133^\circ$. Максимальні значення кута натікання зафіксовано для текстур у формі мікропазів при вимірюванні поперек їх орієнтації ($153\text{--}164^\circ$) та мікростовпчиків ($81\text{--}153^\circ$), тоді як мінімальні значення характерні для поверхонь із мікроямками ($85\text{--}110^\circ$). Такі відмінності зумовлені варіаціями частки площі плато текстури та рівнем дисипації енергії під час переміщення лінії трифазного контакту [4].

Отже, результати експериментальних досліджень свідчать, що мікрофрезеровані текстури сприяють переходу змочування поверхонь сплаву NiTi до режиму з домінуванням ефектів закріплення трифазної лінії контакту, що супроводжується підвищеним гістерезисом. Відповідно, формування текстур на поверхнях NiTi є ефек-

тивним інструментом керування їх змочувальними характеристиками, зокрема динамікою трифазної лінії контакту [5].

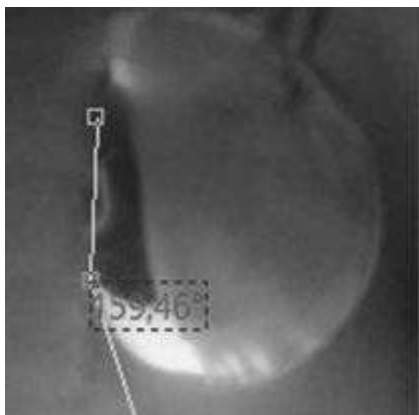


Рис. 2 – Вимірювання максимального значення кута натікання [3]

Література

1. Балицька Н. О., Мельничук П. П. Мікрофрезерування як спосіб текстурування поверхонь сплавів Ni–Ti для модифікації змочуваності // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. № 1 (347). С. 478–485.

2. Балицька Н. О. Технологічні особливості мікрофрезерного текстурування поверхонь сплаву NiTi // Технічна інженерія. 2025. № 2 (96). С. 3–12.

3. Myronyuk O., Baklan D., Rodin A., Pitak Y., Balytska N., Yong Z. Determination of 60–500 μm textures on polydimethylsiloxane surfaces wetting properties // 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2025. P. 1–4.

4. Kumar P., Mulvaney P., Harvie D. J. E. Energy dissipation during homogeneous wetting of surfaces with randomly and periodically distributed cylindrical pillars // Journal of Colloid and Interface Science. 2024. Vol. 659. P. 105–118.

5. Kalinin Y., Berejnov V., Thorne R. Contact line pinning by microfabricated patterns: effects of microscale topography // Langmuir. 2009. Vol. 25, No. 9. P. 5391–5397.

*Беженар М.П., Пацук А.М., Соколов О.М.,
Романенко Я.М.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

НОВІ PCBN КОМПОЗИТИ VL ГРУПИ – ПРОГРЕСИВНІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України розроблено нові PCBN композити VL групи: BN45, BN50, BN65, об'ємний вміст cBN в яких – 45, 50 і 65% відповідно, зв'язка на основі TiCN (BN45), TiC(BN50) TiN(BN65). Дослідні зразки – двохшарові PCBN композити круглої форми діаметром 55 мм, товщиною 3,2 мм, товщина шару cBN – 0,8 мм, підкладка із твердого сплаву WC – 13% Co. Метод одержання – спікання в кубічному апараті високого тиску при температурі 1600 °C і тиску 5,5 ГПа. В цеху пресформ заводу твердих сплавів, місто Куньшань, Китай, проведено випробування їх працездатності при точінні загартованої сталі. Для порівняння, випробовували також аналогічні матеріали компанії E6.

Для випробувань використовувалися різальні пластини з напаяними вставками з PCBN композитів. Форма різальної пластини WNMG080408. Напаяні з використанням срібного припою вставки з PCBN композитів – рівнобедрені трикутники з основою 4 мм та кутом при вершині 80°, товщина пластини 1,6 мм, радіус при вершині 1,6 мм, фаска, що зміцнює 0,1-20°. Геометричні параметри різальної частини: передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$, кут нахилу різальної кромки $\lambda = 0$.

Дослідження різальних властивостей PCBN композитів проводили при сухому точінні на токарному верстаті з ЧПУ марки Vturn-20. Різання проводили без ударного навантаження.

Обробляли заготовки загартованої до твердості 59–62 HRC сталі ХВГ. Розміри заготовок: діаметр 95 мм, довжина 120 мм.

Режим випробувань: швидкість різання $V = 200$ м/хв; глибина різання $t = 0,2$ мм; подача $f = 0,1$ мм/об.

Еталонні вироби. Різальні вставки PCBN композитів компанії Element Six DCN450 (система cBN-TiCN), DCC500 (система cBN-TiC), DCX650 (система cBN-TiN).

За критерій працездатності вибрано величину (висоту) фаски зносу різальної пластини по задній поверхні. Вимірювання висоти

фаски зносу проводити до повного зносу різця (до досягнення 0,4 мм висоти фаски зносу, або до руйнування (сколу) різальної кромки). Вимірювання висоти фаски зносу проводилося після зйому 20 см³ об'єму заготовки, після цього продовжували випробування і після зйому чергових 20 см³ знову вимірювали знос, і так до повного зносу різця.

Для вимірювання висоти фаски зносу використовували оптичний мікроскоп, висоту фаски зносу вимірювали з точністю 0,001 мм. Результати випробувань представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати випробувань різальних властивостей PCBN композитів

Шифр зразка	Висота фаски зносу (мм) по задній поверхні при зйомі матеріалу заготовки (см ³)						
	20	40	60	80	100	120	140
система cBN–TiCN							
BN45-1	0,033	0,048	0,057	0,122	скол	–	–
BN45-2	0,037	0,054	0,068	0,196	скол		
DCN450	0,036	0,048	скол	-	–	–	–
система cBN–TiC							
BN50	0,042	0,048	0,051	0,268 (скол)	–	–	–
DCC500	0,033	0,048	0,064	0,572 (скол)	–	–	–
система cBN–TiN							
BN65-1	0,109	0,135	0,170	0,192	0,199	–	–
BN65-2	0,044	0,067	0,096	0,106	0,125	0,143	0,385 (скол)
DCX650-1	0,059	0,147	0,223	0,230	–	–	–
DCX650-2	0,057	0,085	0,116	-	–	–	–

На рис. 1 наведені приклади фотографій фасок зносу пластин після випробувань для композитів BN45-1 системи cBN–TiCN (рис. 1, а) та BN65-2 системи, cBN–TiN (рис. 1, б).

Висновок. При обробці загартованої сталі ХВГ твердістю 59–62 HRC в режимі гладкого точіння різальні пластини з PCBN композитів розроблених в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України показали високу зносостійкість, працювали не гірше за пластини-аналоги виробництва Е6. Працездатність композитів розроблених в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України відповідає працездатності еталонних виробів компанії Element Six.

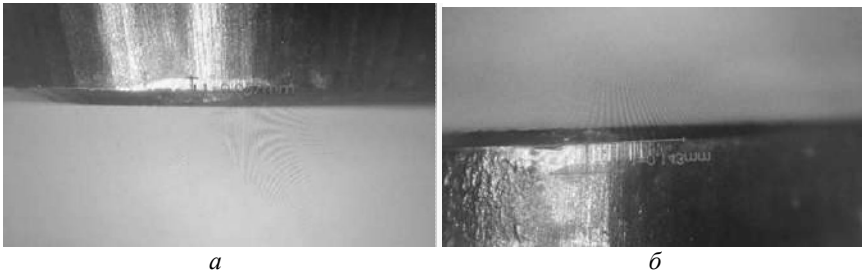


Рис. 1 – Фотографія фаски зносу пластини BN45-1, система cBN–TiCN після зйому 60 см³ сталі ХВГ HRC 59-62 (а) та пластини BN65-2, система cBN–TiN після зйому 120 см³ сталі ХВГ 59–62 HRC (б) при режимі різання $V = 200$ м/хв, $t = 0,2$ мм, $f = 0,1$ мм /об.

*Береговець Б.С., Данюк О.О., Коваленко М.І.,
Ночвай В.М., Полонський Л.Г. Державний університет
«Житомирська політехніка», Житомир*

РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАНЬ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ РОБОЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ НА СУПОРТІ УСТАНОВКИ КНПА-1,2М

В лабораторії газотермічних покриттів та зварювання Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено та виготовлено експериментально-дослідну установку КНПА-1,2М, призначену для механізованого напilenня покриттів на плоскі деталі та деталі типу «вал». Задачі, які вирішуються за допомогою даної установки: закріплення деталі в центрах; обертання деталі із заданою швидкістю; закріплення апарата напilenня покриттів; повздовжнє переміщення апарата напilenня із заданою швидкістю; відведення продуктів згоряння газів та пилу із робочої зони.

Основою установки КНПА-1,2М є камера для напilenня, в якій встановлені: передня та задня бабки, в центрах яких розміщують та закріплюють напильовану деталь; робочий стіл для розташування плоских деталей; привід обертання деталі; супорт для закріплення апарата напilenня та привід для повздовжнього переміщення; пульт керування.

Конструкція супорта установки дає можливість закріплювати на ньому за допомогою пристосувань різні робочі інструменти, а саме: газополуменеві пальники для напилення покриттів мод. ГАЛ-6; пістолети-розпилювачі установок мод. Л5405А, мод. УГПТ-П, мод. УГПТ тощо; ручні електродугові металізатори мод. ЕМ-14; газові металізатори мод. МГИ-4; плазмотрони установок плазмового напилення покриттів мод. УПУ-8М, «Київ-7».

З цією метою розроблено комплект пристосувань для закріплення на супорті установки апаратів нанесення газотермічних покриттів, пістолетів-розпилювачів, плазмотронів при роботі з плоскими та циліндричними деталями.

Напилювану деталь типу «вал» закріплюють у трикулачковому патроні горизонтального механізму обертання деталі і фіксують з іншої сторони за допомогою розробленого пристрою з обертотримним центром. Апарат для напилення закріплюють на супорті, переміщення якого паралельне осі обертання деталі забезпечується спеціальним приводом. Газовий струмінь пістолета-розпилювача у такому випадку знаходиться у горизонтальному положенні. При нанесенні покриттів на плоскі деталі останні розміщують на робочому столі установки. Апарат для напилення за допомогою розробленого пристосування закріплюють на супорті установки. Газовий струмінь при цьому знаходиться у вертикальному положенні. Переміщення апарата для напилення паралельно площини деталі забезпечується приводом поздовжнього переміщення.

Установка КНПА-1,2М застосовується для дослідних цілей і в навчальному процесі.

Візняк В.Г., Скурихін Д.Г. Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ДОКУМЕНТАЦІЙНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

У сучасних умовах функціонування технічних підприємств документальне забезпечення метрологічної діяльності виходить далеко за межі формального ведення формулярів, журналів та інструкцій. Воно є однією з базових умов підтвердження компетен-

тності лабораторії, забезпечення простежуваності вимірювань, обґрунтованості результатів контролю та довіри до висновків, що формуються за підсумками вимірювальних і контрольних операцій. За таких умов документація набуває статусу не допоміжного, а системоутворювального елемента, який забезпечує впорядкованість процедур, стабільність роботи лабораторії та нормативну коректність усіх етапів вимірювального процесу.

Ефективне проходження атестації метрологічної лабораторії не може ґрунтуватися лише на наявності справних засобів вимірювальної техніки чи формальному дотриманні графіків перевірки. Його основою є цілісна система документованих процедур, що охоплює збір, реєстрацію, зберігання та обробку результатів вимірювань, регламентацію взаємодії між структурними підрозділами, забезпечення простежуваності вимірювань, аналіз невідповідностей, а також технічний і організаційний супровід внутрішнього метрологічного нагляду. Саме завдяки такій системі документація перестає бути пасивним архівом і перетворюється на активний інструмент забезпечення якості, який підтримує відтворюваність результатів, підвищує керованість процесів та сприяє своєчасному виявленню відхилень.

Особливого значення набуває узгодженість усіх документованих елементів: від технічних і метрологічних записів до внутрішніх регламентів, процедур взаємодії та правил оформлення звітної документації. Саме ця узгодженість забезпечує належний рівень організації вимірювальних робіт, зменшує імовірність помилок, підвищує прозорість функціонування лабораторії та створює основу для стабільної відповідності встановленим вимогам. У такому розумінні вдосконалення потребують не окремі форми документів, а вся система їх побудови, актуалізації, обігу та практичного використання в управлінні вимірювальними процесами.

Цінність такого підходу полягає в тому, що він переводить питання атестації лабораторії з площини разового адміністративного заходу у площину системної виробничої культури. Належно організоване документальне забезпечення дозволяє зменшити ризики недостовірних вимірювань, підвищити стабільність виробничих процесів, зміцнити зв'язок між системою менеджменту якості та метрологічним забезпеченням, а також забезпечити реальну, а не декларативну готовність лабораторії до зовнішнього оцінювання. У ширшому контексті така організація документаційної роботи має значення не лише для окремої лабораторії, а й для будь-якого підприємства, де результат вимірювання є підставою для техніч-

ного рішення, підтвердження відповідності, випуску продукції чи оцінювання безпечності процесу. Отже, документальне забезпечення метрологічної діяльності слід розглядати як інструмент організаційного впорядкування, технічної відповідальності та зміцнення довіри до всієї системи вимірювального контролю.

Література

1. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII.
2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
3. МІ 2304-08. ДСІ. Метрологічний нагляд, що здійснюється метрологічними службами юридичних осіб. Загальні положення.
4. МІ 2240-98. ДСІ. Аналіз стану вимірювань, контролю та випробувань на підприємстві, в організації, об'єднанні. Методика та порядок проведення робіт.
5. МІ 2427-97. ДСІ. Оцінка стану вимірювань у випробувальних і вимірювальних лабораторіях.

Вовк В.А. Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПОНОВОК МОБІЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ РЕМОНТІ ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛІВ

Для відновлення роботи великогабаритної деталі транспортного та важкого машинобудування необхідно провести механічну обробку безпосередньо на місці її експлуатації. Використання мобільного портативного верстата агрегатно-модульної конструкції дозволить ефективно вирішити проблему доступу до дефектних зон. Однак, складність ремонтного виробництва на самому транспорті полягає у тому, що вимірювальні та технологічні бази об'єкта, що використовуються для встановлення самого верстата, зазвичай можуть зазнати значне експлуатаційне зношення, корозію чи за залишкову пластичну деформацію [1].

Вважається, що опорна поверхня є відносно рівною та жорсткою при класичному проектуванні компоновок верстатного обладнання. В умовах реального ремонту монтаж модулів може привести до просторових перекосів на етапі збирання систем. Похибка взаємного просторового розташування базового вузла неминуче переноситься на траєкторію руху різального інструменту, навіть за умови високої власної жорсткості окремого модуля [2].

Підхід до проектування компоновок може бути розглянутим та залученим для розв'язання проблеми, що ґрунтується на попередньому лазерному чи оптичному 3D-скануванні ремонтної зони об'єкта. Структура верстата може формуватися варіативно під топологію конкретних зношених поверхонь, замість використання жорстко стандартизованих схем складання. Отримана інформація дозволяє реалізувати метод метрологічного віртуального базування: масив даних буде аналізуватися для визначення оптимальної площини закріплення опорного модуля. Мінімізація вильоту шпиндельного вузла та забезпечення раціонального замикання силового контуру системи (портативний верстат – зношена деталь) стають головними критеріями вибору конфігурації [3].

Література

1. Петренко О. В., Сидоренко В. К. Технологічні основи ремонту та відновлення великогабаритних деталей рухомого складу. Дніпро: Транспортні інновації, 2021. 215 с.
2. Ковальчук І. М. Просторове базування мобільних металообробних систем: механіка та похибки // Вісник машинобудування та транспорту. 2022. № 2. С. 45–51.
3. Мельник С. О., Тарасенко О. П. Застосування методів просторової метрології при модернізації та ремонті важкого обладнання // Технологічні комплекси та системи. 2023. Вип. 4 (18). С. 72–78.

ВПЛИВ БАРИЧНОЇ ОБРОБКИ СПЕЧЕНИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ WC-15% Me НА ЇХ КОЕРЦИТИВНУ СИЛУ

Однією із важливих характеристик, що обов'язково контролюється при виробництві твердосплавних виробів є коерцитивна сила. Це структурно-чутлива характеристика [1]. В твердих сплавах зміна значення коерцитивної сили безпосередньо пов'язана зі збільшенням або зменшенням дисперсності карбідної складової, а також товщиною прошарку пластичної зв'язуючої фази (переважно це феромагнетики). Так як дисперсність безпосередньо впливає на площу міжзеренних границь, які є концентраторами напружень, місцем скупчення дефектів і по суті є перешкодою для проходження магнітних доменів, то зі збільшенням дисперсності зерен буде рости значення коерцитивної сили.

Методи виготовлення твердих сплавів можуть включати не тільки вільне спікання матеріалів різних складів, але і різноманітні методи їх обробки [2–8], які завжди направлені на зміну структурного стану матеріалів для підвищення їх експлуатаційних та механічних характеристик.

Тому метою роботи було визначення змін коерцитивної сили в сплавах WC-15% Co, WC-15% Ni, WC-15% (Co, Ni) внаслідок дії на них високого тиску без додаткового нагрівання. Для цього виготовлені твердосплавні дослідні зразки за стандартною технологією [9] та додатково оброблені тиском 8ГПа в апараті високого тиску за кімнатної температури (20 °С). На спечених та баришно оброблених зразках вимірювали коерцитивну силу H_c допомогою приладу «Кобальт-1», що призначений для вимірювання коерцитивної сили твердих сплавів на кобальтовій основі [10], який дозволяє намагнічувати зразки постійним струмом до технічного насичення в постійному магнітному полі та забезпечує його повне розмагнічення. По приладу визначають коерцитивну силу, що відповідає нульовій залишковій намагніченості ($M = 0$).

Порівняльні значення коерцитивної сили твердих сплавів WC-15% Me до та після обробки тиском наведено на рис. 1.

Зниження коерцитивної сили відбувається у всіх сплавах незалежно від типу зв'язки і в першу хвилину навантаження спечених

зразків до 8 ГПа без нагрівання. Таке падіння значень можна пояснити “розрихленням” карбідного скелету, внаслідок руйнування та підвищення дефектності границь зерен при дії високого тиску. Також, це може вказувати на зміни в структурному стані матеріалів, що може проявлятися і на рівні кристалічної будови компонентів сплаву.

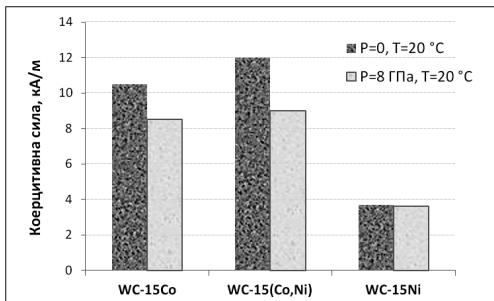


Рис. 1 – Порівняння значень коерцитивної сили спечених твердих сплавів різних складів до та після обробки тиском 8 ГПа за кімнатної температури

Підсумовуючи, можна констатувати, що у сплавів з вмістом зв’язки (15% за масою) на основі Co та (Co,Ni) внаслідок обробки тиском 8 ГПа без нагрівання знижуються значення коерцитивної сили на 20 та 30% відповідно.

Для сплавів на основі Ni зв’язки значення коерцитивної сили низькі (прилад не чуттєвий до них), тому цей метод визначення коерцитивної сили для таких сплавів виявився не інформативним.

Література

1. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. Москва: Высшая школа, 1982. 288 с.
2. Лаптев А. В., Пономарев С. С., Очкас Л. Ф. Особенности структуры и свойств сплава 84 % WC–16 % Co, полученного горячим прессованием в твердой и жидкой фазах // Порошковая металлургия. 2001. № 9–10. С. 3–13.
3. Jo A.-R., An J.-S., Kim S.-H., Jeong M.-S., Moon Y.-H., Hwang S.-K. Novel tensile test jig and mechanical properties of WC–Co synthesized by SHIP and HIP process // Metals. 2021. Vol. 11. P. 884.
4. Xiang Z., Li Z., Chang F., Dai P. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of ultrafine WC–Co cemented carbide // Metals. 2019. Vol. 9, No. 12. P. 1302.

5. Owais T. M. Impact of pressure on sintering of cemented carbides: master's thesis (materials science). Stockholm: KTH Industrial Engineering and Management, 2013.

6. Jiang Y., Chen D. Effect of cryogenic treatment on WC–Co cemented carbides // Materials Science and Engineering A. 2011. Vol. 528, No. 3. P. 1735–1739.

7. Прокопів Н. М., Бондаренко В. П., Харченко О. В., Гнатенко І. А. Влияние термокомпрессионной обработки на структуру и свойства сплава WC–Co с добавками Cr \square C \square // Сверхтвердые материалы. 2006. № 6. С. 47–51.

8. Hnatenko I. O., Andreiev I. V., Bondarenko V. P. Analyzing the effect of high pressures and temperatures on the formation of the structure and properties of WC–Co hard alloys // Superhard Materials. 2021. Vol. 43, No. 4. P. 261–264.

9. Бондаренко В. П., Павлоцька Э. Г. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно-контролируемой газовой среде. Київ: Наукова думка, 1995. 204 с.

10. Мардин В. В., Кривоносов А. И. Справочник по электронным измерительным приборам. Москва: Связь, 1978. 406 с.

*Губатюк Р.С., Прокоф'єв О.С., Римар С.В.,
Пантелеймонов Є.О., Абдулах В.М., Коваленко Д.В.,
Нікрітін О.Л., Романенко І.М., Милашенко Н.В. Інститут
електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
Сорока Б.С., Згурський В.О. Інститут газу НАН України,
Воробйов М.В. Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ*

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕКУПЕРАТОРА УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ПОВОРОТНОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Розроблення і створення нового теплотехнічного устаткування підвищеної ефективності є актуальною проблемою енерго- та ресурсозбереження. Моделювання теплових процесів дозволяє визначити більш ефективні конструкції теплотехнічного устаткування з покращеними характеристиками використання теплової енергії.

Інститутом газу НАН України, із застосуванням сучасних методів моделювання теплових процесів, розроблена конструкція рекуператора для більш ефективної утилізації тепла в якій застосовані вторинні випромінювачі у вигляді поздовжніх ребер на його активній поверхні для збільшення площі передачі тепла і покращення аеродинамічних характеристик газового потоку. В конструкції рекуператора застосовані леговані, корозійно- та жаростійкі сталі, котрі підвищують його надійність і довговічність. Для виготовлення рекуператора передбачено застосування технологій дугового зварювання складних просторових конструкцій з наявністю кільцевих і еліпсних швів, як в поворотних, так і в неповоротних стиках, монтажних швів, а також можливого застосування технологічних процесів нанесення корозійно- та жаростійкого захисного покриття.

Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено конструкторську документацію на рекуператор із застосуванням зварювальних технологічних процесів для його виготовлення. На рис. 1 представлено основні елементи конструкції рекуператора.

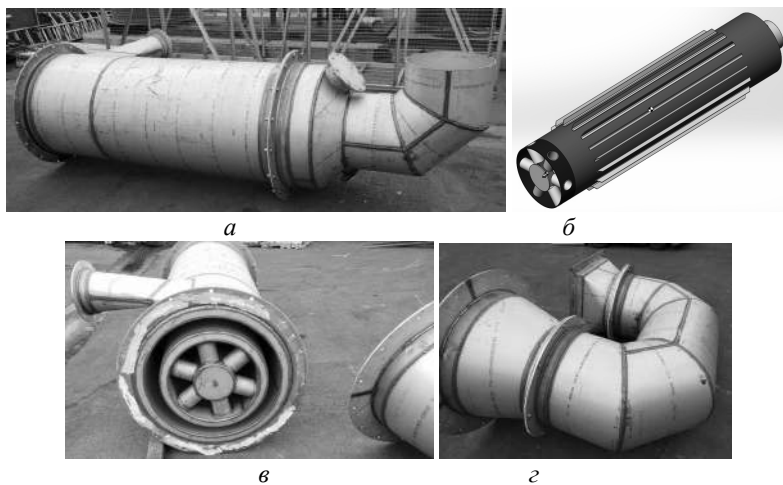


Рис. 1 – Основні елементи конструкції рекуператора: *a* – основна частина; *б* – вторинні випромінювачі у вигляді ребер на активній поверхні; *в* – внутрішні канали рекуператора; *г* – тепловий канал

Де показано: *a* – основна частина із неповоротними кільцевими, еліпсними, фланцевими і зварними швами; *б* – вторинні випромінювачі у вигляді ребер на активній поверхні із поздовжніми зва-

рними швами; ϵ – внутрішні канали рекуператора із кільцевими зварними швами жаростійких корозійностійких сталей; ζ – тепловий канал із неповоротними кільцевими, еліптичними і фланцевими зварними швами.

На рис. 2 зображено рекуператор, змонтований із плавильною піччю з використанням монтажної зварної несучої конструкції.



Рис. 2 – Рекуператор, змонтований із плавильною піччю

Спільно з Українським науково-технологічним центром (УНТЦ) розроблена конструкція рекуператора виготовлена в США (California Energy Commission (CEC)) і впроваджена у виробництво для утилізації тепла відведених газів поворотної алюмінієво-плавильної печі для нагрівання повітря, що подається в піч.

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

ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ НАГРІВАННЯ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ ПРОФІЛІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В галузі ракетобудування актуальною є проблема з'єднання суцільних заготовок товщиною до 100 мм та широкої номенклатури профілів розвиненого перерізу, серед яких: шпангоути із площею

перерізу до 60000 мм^2 ; поздовжні шви обичайок корпусів паливних ємностей перерізом до $2000 \times 45 \text{ мм}^2$. Складність зварювання алюмінієвих сплавів пов'язана з їх високою теплопровідністю, високою схильністю до окислення, наявністю на поверхні тугоплавкої оксидної плівки та необхідністю збереження механічних властивостей термічно- та термомеханічно зміцнених сплавів.

Для зварювання виробів ракетної техніки в Україні використовують контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). Існуюче устаткування для КСЗО дозволяє зварювати заготовки з алюмінієвих сплавів з площею поперечного перерізу до 90000 мм^2 . При зварюванні заготовок великої товщини, в цикл процесу КСЗО додається етап попереднього контактного нагрівання опором.

Дослідженнями встановлено ефективність застосування на етапі попереднього нагрівання опором перехідного елемента (вставки) із матеріалу з високим електричним опором (сталь 12Х18Н10Т, титановий сплав) для інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту.

В роботі проводили розрахункове та експериментальне дослідження ефективності застосування проміжних вставок з високим омичним опором із сталі 12Х18Н10Т та сплаву ВТ6 як концентраторів нагріву на етапі підігріву опором при КСЗО алюмінієвого сплаву 2219. Розрахунковим шляхом встановлено суттєве зростання градієнту температурного поля при збільшенні щільності струму з $10\text{--}20 \text{ А/мм}^2$ в деталях при нагріванні через вставку із ВТ6, порівняно із вставкою 12Х18Н10Т.

Визначено критерій максимального градієнту у зоні нагрівання опором – температура на торцях заготовок не має перевищувати температуру плавлення евтектики CuAl_2 $T_{\text{пл}} = 548 \text{ }^\circ\text{C}$, що може призводити до підплавлення сплаву 2219.

Експериментальне дослідження нерівномірності нагрівання заготовок при односторонньому підведенні зварювального струму показало збільшення різниці температур на відстані 5 мм від площини контакту «вставка-заготовка» з $\Delta T = 25\text{--}31 \text{ }^\circ\text{C}$ у випадку нагрівання без вставки до більш ніж $70 \text{ }^\circ\text{C}$ для обох видів вставок (ВТ6 та 12Х18Н10Т) на базі вимірювання 50 мм. Нерівномірність нагрівання вставок із ВТ6 та 12Х18Н10Т досягає максимуму у $\Delta T = 242 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\Delta T = 202 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно.

Запропоновано застосування комбінованих вставок з внутрішнім шаром із матеріалу з високим омичним опором та зовнішніми шарами із матеріалу з високими показниками тепло- та електропро-

відності, що дозволяє здійснити перерозподіл температури по перерізу вставки і, як наслідок, по перерізу заготовок, що зварюються. Встановлено ефективність застосування комбінованих вставок із зовнішніми шарами із міді для зменшення різниці температур як у самій вставці, так і в заготовках що зварюються. Показано, що для вставки з внутрішнім шаром із сталі 12Х18Н10Т зі збільшенням товщини шарів міді з 2 мм до 5 мм нерівномірність нагрівання заготовок зменшується з $\Delta T = 58\text{ }^\circ\text{C}$ до $\Delta T = 33\text{ }^\circ\text{C}$.

За експериментальними даними розрахована ефективність підігріву опором алюмінієвих сплавів при КСЗО через вставки та без вставок. Показано, що застосування вставок з високим омичним опором збільшує співвідношення витраченої електричної енергії на етапі попереднього нагрівання опором до виділеної теплової енергії нагріву більше ніж в 5 разів.

Запропонована технологія КСЗО з комбінованою схемою контактного нагрівання заготовок сплаву 2219 перерізом $18 \times 60\text{ мм}^2$ забезпечує формування якісних (бездефектних) з'єднань та суттєве зменшення ширини зони термічного впливу при збільшенні конструкційної міцності з'єднань.

Суттєве зростання градієнта температурного поля при нагріванні через вставку створює передумови для скорочення тривалості етапу оплавлення та зменшення ширини зони термічного впливу (ЗТВ). Виходячи з цього проведено дослідні зварювання та проведено дослідження мікроструктури отриманих зварних з'єднань та розподілу часток фазових виділень (θ -фази) в зоні з'єднання. При проведенні дослідних зварювань, за базовий прийнято режим КСЗО з попереднім нагрівом опором та припуском на зварювання $l_{зв} = 60\text{ мм}$. Підігрів опором проводився через комбіновану вставку із аустенітної сталі 12Х18Н10Т товщиною 7 мм з накладками з міді товщиною 2+2 мм.

По лінії з'єднання розмір часток θ -фази варіюється від 0,13 мкм до 1,87 мкм, а їх загальна кількість значно менша в порівнянні з основним металом сплаву 2219. Спостерігається скупчення часток θ -фази в зоні шириною до 50 мкм, що свідчить про формування з'єднання через тонкий шар розплаву та виділення дисперсних часток θ -фази при охолодженні. Відсутні скупчення часток у вигляді «ланцюжків», кількість часток розміром 4–8 мкм майже вдвічі перевищує кількість таких в ОМ, що пов'язано з механічним подрібненням при інтенсивній пластичній деформації та частковим розчиненням θ -фази під дією високотемпературної деформації. Вста-

новлено зниження показників твердості у зоні з'єднання, обумовлене розчиненням нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази під впливом термічного циклу КСЗО.

Аналогічні дослідження мікроструктурних змін та розподілу твердості проводили для процесу КСЗО заготовок сплаву системи Al-Zn-Mg для різних термічних циклів та умов деформації при осадці. Встановлено особливості тонкої структури металу у зоні з'єднання, визначено закономірності зміни морфології фазових виділень при КСЗО з комбінованою схемою нагрівання.

*Девін Л. М., Цисар М. О., Лещук О. О.,
Ричев С. В., Льницька Г. Д.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВИСОКОМІЦНИХ ТЕРМОСТІЙКИХ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ ТИПУ ІЬ РОЗМІРОМ 1,5–3,0 мм, ДЛЯ ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНОГО БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

Для визначення характеристик міцності монокристалів алмазів при динамічних навантаженнях, а також виявлення особливостей їх руйнування в умовах високошвидкісного навантаження, в ІНМ використовується установка «копер» (рис. 1, а) з електромагнітним прискорювачем (гармата Гауса) [1], яка працює на основі мірних стрижнів Гопкінсона-Кольського [2]. Ця установка дозволяє вимірювати енергію руйнування, реєстрацію параметрів удару, з використанням високошвидкісного аналого-цифрового перетворювача АЦП Е20-10. Сила удару на цій установці може досягати понад 50 кН.

На установці «копер» одержують імпульси пружної деформації (рис. 1, б) в мірних стрижнях прямої хвилі (1), відбитої (2) і тої, що пройшла через зразок (3). В момент удару бойка по плоскому торцю верхнього стрижня, в ньому збуджується пружна хвиля стискування, яка переміщається по стрижню зі швидкістю звуку.

Досліджено партію вихідних кристалів алмазів типу ІЬ як до так і після їх хімічного полірування і термообробки. Фотографії контактних площин отримані на мікроскопі МБС-10 з цифровою ка-

метою (рис. 2). Обчислення площі контактних граней виконували програмою Image Pro Plus.

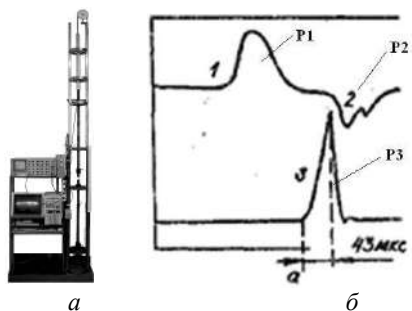


Рис. 1 – Установка «копер» (а); хвилі, що реструються (б)

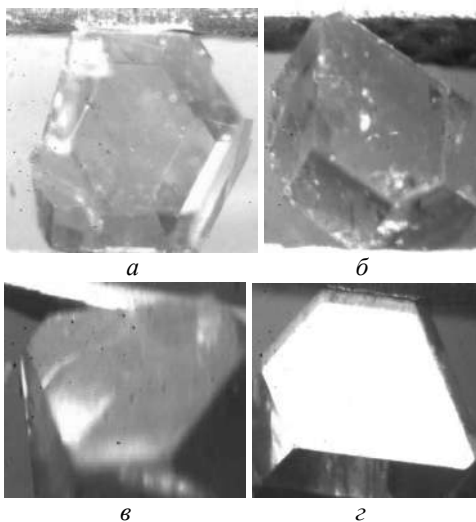


Рис. 2 – Фотографії контактних площин – вихідного монокристала ($F_{к1} = 1,269 \text{ мм}^2$) (а), після термообробки ($F_{к1} = 2,406 \text{ мм}^2$) (б), після термохімічного полірування ($F_{к1} = 2,261 \text{ мм}^2$) (в) та після термохімічного комбінованої обробки ($F_{к1} = 2,764 \text{ мм}^2$) (г)

Після руйнування отримали значення межі міцності при стисканні $\sigma_R = P/F_k$, які наведені в табл. 1.

Для оцінки надійності параметрів розподілів міцності використовували метод бутстрепа. Метод бутстрепа (bootstrap) — це потужний непараметричний статистичний метод, який дозволяє оцінити розподіл, дисперсію, довірчі інтервали та стандартні помилки

для будь-якої статистики шляхом багаторазового випадкового псевдовибору даних з поверненням. Він базується на генерації тисяч псевдовибірок, що дозволяє працювати з малими обсягами даних або складними моделями без знання теоретичного розподілу [3].

Таблиця 1 – Результати визначення міцності кристалів типу Ib

Кристал	Площа F_{k1} , мм ²	Площа F_{k2} , мм ²	Середня міцність σ_R , МПа	Довірчий інтервал, МПа	Відносна похибка δ , %
Вихідні кристали	1,269	1,386	989	196	20
Кристали після термообробки	2,406	1,098	769	203	26
Кристали після термохімічного полірування	1,268	2,261	613	104	17
Кристали після комбінованої обробки	2,764	1,172	5823	1138	20

Для застосування цього методу ми розробили програму на Python, яка створювала велику кількість (не менше 800) вибірок із повторною вибіркою із вихідних даних із поверненням. Потім для кожної вибірки обчислювали параметри розподілу. Довірчий інтервал 95% будується як відстань від 2,5 до 97,5% отриманих значень. У таблиці результат відображається як "параметр \pm довірчий інтервал". Дослідження міцності монокристалів алмазів Ib типу показало, що розподіл відповідає закону Вейбула.

За результатами проведених досліджень міцності монокристалів типу Ib, можна зробити висновок, що більшою мірою на міцність термостійких кристалів впливає комбінована обробка, яка призводить до значного збільшення міцності (майже в 5 разів). Механізм такого збільшення поки що вивчається, але як гіпотеза – можливо металеві вclusions в монокристалах в процесі комбінованої обробки виходять на поверхню, що знижує залишкові напруження, які впливають на процес руйнування.

Література

1. Devin L. N. Peculiarities of determining the physico-mechanical characteristics of brittle materials on small-sized specimens // Strength of Materials. 2018. Vol. 50. P. 909–917.

2. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Иванов С. А. Силоизмерительное устройство для динамических испытаний материалов // Заводская лаборатория. 1980. Т. 46, № 7. С. 65–67.

3. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife // Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, No. 1. P. 1–26. DOI: 10.1214/aos/1176344552.

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

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ В ЗОНІ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ

При впровадженні нових конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) на ДП «Івченко-Прогрес» і АТ «Мотор Січ» актуальним є розроблення технологій зварювання тиском жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) та інтерметалідних сплавів у одно- та різно- рідному сполученнях. Використання інноваційних конструкцій ГТД стримується проблемами, які обумовлені складністю одержання нероз'ємних з'єднань жароміцних сплавів. При способах зварювання тиском проблеми якісного з'єднання ЖНС обумовлені специфічними теплофізичними характеристиками і значним опором пластичній деформації, широкими температурними інтервалами крихкості сплавів. Аналогічні проблеми виникають і при зварюванні сплавів на основі інтерметалідів титану.

Світовий досвід і попередні дослідження, проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, свідчать про ефективність використання при виготовленні вузлів авіаційних ГТД із ЖНС технології комбінованого зварювання тертям (ЗТ) (<https://doi.org/10.37434/as2020.08.06>). Для реалізації розроблених рішень у реальних зварних конструкціях потребують вирішення проблеми наявної хімічної неоднорідності та деградації зміцнюючої γ' -фази ЖНС у зоні з'єднання. Розроблення технологічних рішень, спрямованих на вирішення наявних проблем, потребували проведення комплексних досліджень формування різнорідних з'єднань ЖНС при технологіях конвенційного і комбінованого ЗТ.

Дослідження, які проводили у цьому напрямку, склалися із трьох етапів: етап 1 – дослідження впливу вихідної структури ЖНС на формування структурної та хімічної неоднорідності з'єднань при ЗТ; етап 2 – встановлення впливу термічного циклу та умов деформації при ЗТ на зміну текстури прокату, мікроструктури, морфології неметалічних включень, фазових виділень, зміцнюючих фаз у з'єднаннях; етап 3 – розроблення технологічних засад мінімізації структурної і хімічної неоднорідності у різнорідних з'єднаннях ЖНС для забезпечення нормативних вимог виробників.

Досліджували формування структури металу в зоні з'єднання сплавів ВЖЛ12У та ЕІ698ВД при різних варіантах примусової зупинки процесу ЗТ. Для дослідження умов деформації при ЗТ на формування структури металу в зоні з'єднання проводили експерименти по зупинці обертання на різних стадіях ЗТ за трьома варіантами: миттєве гальмування із зниженням тиску до нуля (варіант 1), миттєве гальмування без зниження тиску (варіант 2), миттєве гальмування, з розведенням заготовок (варіант 3), поступове гальмування без зниження тиску (варіант 4). Окружна швидкість (V) при обраних частотах обертання становила $V = 0,5; 1,0; 2,0$ м/с, тиск при нагріванні змінювали в межах $P_H = 100\text{--}500$ МПа.

При миттєвому гальмуванні зупинка обертання відбувалась за час $0,2$ с і заготовка здійснювала не більше одного оберту до повної зупинки обертання. При поступовому гальмуванні встановлювали час до повної зупинки обертання $t_g = 1,0$ с. Під час експериментів задавали значення частоти обертання і тиску при нагріванні перед зупинкою обертання.

Аналіз поверхні зразків після зупинки процесу ЗТ по варіанту 1 при значенні t_H менше $5,0$ с дозволяє зробити висновок, що процеси контактної взаємодії на початкових стадіях ЗТ характеризуються вибуховим руйнуванням фрикційних зв'язків, аналогічному такому, що має місце при контактному стиковому зварюванні оплавленням. Наявність виплесків металу, що розходяться у різні боки, свідчить, що вже на початковій стадії процесу ЗТ у зоні контактної взаємодії температура металу перевищує значення температури плавлення, принаймні на локальних ділянках перерізу заготовок, що зварюються. Швидкість нагрівання металу на цих ділянках може складати $(1\text{--}2) \cdot 10^3$ °С/с.

При зупинці процесу ЗТ по варіанту 2 виплески металу пластично деформуються і спостерігаються у вигляді тонкого шару мета-

лу, нанесеного на поверхню зразків, що зварюються. Встановлено, що до початку осадки (деформації заготовок у макрооб'ємах) не досягається ізоляція зони контакту від взаємодії з навколишнім середовищем, тому процеси окислення поверхонь, що зварюються, до певної міри аналогічні таким, що мають місце при контактному зварюванні оплавленням.

Отже, процес ЗТ на початкових стадіях включає складний комплекс взаємозалежних явищ, а саме: інтенсивне локалізоване тепловиділення на поверхнях тертя, безперервне утворення металевих зв'язків між цими поверхнями й негайне руйнування цих зв'язків внаслідок триваючого відносного руху поверхонь, миттєве нагрівання (до температури плавлення) і швидке охолодження малих об'ємів металу в умовах великого тиску, механічне перемішування металу обох деталей, руйнування наявних оксидних плівок і утворення окислених ділянок під дією кисню навколишнього середовища.

Для периферійних ділянок перерізу заготовок (на відстані від центру $0,8R-1,0R$) більш характерним є руйнування зв'язків по поверхні тертя. У центральній і середній частинах перерізу (на відстані від центру до $0,7R$) процес ЗТ на перших стадіях супроводжується глибинним вириванням, виникненням вихрових утворень і перемішуванням елементів структури. Процес виривання супроводжується інтенсивними механічними змінами навколишніх шарів матеріалу на значну глибину і окисленням поверхневих шарів металу, викликаним хімічною дією навколишнього середовища.

При переважній ролі адгезійного фактору перехід від руйнування зв'язків по поверхні тертя до глибинного виривання визначається градієнтом механічних властивостей у приповерхневих шарах металу. Якщо опір зрізу зі збільшенням відстані від поверхні тертя вглиб металу росте, то руйнування відбувається в площині тертя.

При високих значеннях V і мінімальних значеннях P_n у вищевказаному діапазоні для більшої частини перерізу заготовок характерним є локалізація контактної взаємодії у зоні шириною від 30 до 100 мкм, причому у периферійній частині перерізу спостерігаються ділянки з надзвичайно дрібнозернистою структурою, які імовірно знаходились у твердо-рідкому стані. Наявність у зоні контакту локальних ділянок у рідкому стані пояснюється тим, що утворення й руйнування фрикційних зв'язків веде до місцевого виділення тепла в дуже малому об'ємі металу приповерхневого шару, що призводить до локального підвищення температури до температури солідусу сплаву і вище.

При зменшенні опору на зріз зі збільшенням глибини має місце руйнування із глибинним вириванням. На виникнення глибинного виривання суттєво впливають дві обставини: утворення міцного зв'язку між двома поверхнями і наявність негативного градієнту механічних властивостей по глибині від поверхні тертя. При терті із глибинним вириванням миттєва поверхня тертя не збігається з його початковою поверхнею. Якщо відбувається контактне схоплювання із глибинним вириванням, то об'єм шарів металу, залучених у деформацію, можуть бути відносно великим, а характер їх деформування змінюється – виникають вихрові утворення. Як результат, плівки оксидів і адсорбованих газів перемішуються з основним металом сплаву і проникають на значну глибину заготовок від поверхні тертя.

Глибина проникнення поверхневих шарів на початкових стадіях процесу ЗТ залежить від встановлених параметрів режиму зварювання. Встановлено, що при збільшенні тиску при нагріванні у діапазоні $P_H = 100\text{--}500$ МПа і зменшенні окружної швидкості обертання V у діапазоні $2,0\text{--}0,5$ м/с, глибина механічного перемішування поверхневих шарів збільшується в межах $50\text{--}800$ мкм. При аналізі мікроструктури з'єднань, отриманих при миттєвому гальмуванні обертання без зниження тиску, можна зробити висновок, що вихрові утворення під дією тиску проковки трансформуються у структурне утворення, для якого характерна наявність шарів металу, які чергуються.

Отже, якщо на початкових стадіях процесу ЗТ спостерігається виникнення вихрових утворень металу у зоні контакту, то для структури зварного з'єднання характерним буде формування перехідного шару з наявною структурною і хімічною неоднорідністю. При режимах ЗТ, які характеризуються великим значенням окружної швидкості, для структури з'єднань у периферійній частині перерізу характерним є наявність ділянок перехідного шару, які знаходились у рідкому або твердо-рідкому стані. Завданням заключної фази ЗТ у обох випадках є витіснення перехідного шару за межі перерізу заготовок.

Технологічно реалізувати можливість керування заключною стадією формування різномірних з'єднань вдається при інерційному ЗТ за рахунок встановлення заданого моменту інерції маховика і при комбінованому ЗТ за рахунок регульованого гальмування обертання. При комбінованому ЗТ прикладення зусилля проковки на стадії гальмування обертання дозволяє інтенсифікувати деформацію приконттактних об'ємів металу і мінімізувати формування структурної неоднорідності у різномірних з'єднаннях ЖНС.

Аналогічні закономірності формування зони з'єднання встановлено при дослідженні процесу ЗТ сплавів на основі алюмініду титану γ -TiAl, зокрема, при його ЗТ із титановим сплавом ВТЗ-1, а також сталями 40Х9С3 і ЕП303.

Висновки.

1. Дослідженнями формування структури металу в зоні з'єднання сплавів ВЖЛ12У та ЕІ698ВД при різних варіантах зупинки процесу зварювання встановлено, що процес ЗТ на початкових стадіях супроводжується інтенсивними механічними змінами при контактних шарів матеріалу, а також окисненням поверхневих шарів металу, викликаним хімічною дією навколишнього середовища. На початкових стадіях процесу ЗТ переважно мають місце два види контактної взаємодії: руйнування фрикційних зв'язків по поверхні тертя і руйнування з глибинним вириванням.

2. Для периферійних ділянок перерізу заготовок (на відстані від центру $0,8R-1,0R$) характерним є руйнування фрикційних зв'язків по поверхні тертя. При режимах ЗТ, які характеризуються великим значенням окружної швидкості, для структури з'єднань у периферійній частині перерізу характерним є утворення ділянок, що знаходились у твердо-рідкому стані.

4. У центральній і середній частинах перерізу (на відстані до $0,7R$) процес ЗТ на початковій стадії супроводжується глибинним вириванням і виникненням вихрових утворень з перемішуванням елементів структури. Встановлено, що глибина взаємного проникнення поверхневих шарів металу на початкових стадіях процесу ЗТ залежить від встановлених параметрів режиму ЗТ. При збільшенні тиску при нагріванні у діапазоні $P_n = 100-500$ МПа і зменшенні окружної швидкості обертання у діапазоні $V = 2,0-0,5$ м/с глибина механічного перемішування збільшується в межах від 50 до 800 мкм.

5. Вихрові утворення металу під дією тиску при нагріванні і проковці трансформуються у структурне утворення, для якого характерна наявність шарів металу обох сплавів, що чергуються, тобто формується перехідний шар з наявною структурною і хімічною неоднорідністю. Встановлено можливість досягнення у зоні контакту температури солідус більш легovanого сплаву ВЖЛ12У. Утворення розплаву має локальний характер.

6. Визначено підходи до оптимізації технології ЗТ жароміцних сплавів: для мінімізації ширини зони несприятливих фазових перетворень у зоні з'єднання необхідно застосовувати порівняно низькі значення окружної швидкості й високі значення тиску.

7. При збільшенні тривалості стадії гальмування обертання збільшується швидкість деформації (осадки), а ширина зони структурних і фазових перетворень зменшується. Змінюючи динаміку гальмування обертання на заключній стадії ЗТ можна забезпечити витіснення перехідного шару і ділянок, що знаходились у твердо-рідкому стані, за межі перерізу заготовок.

8. Прикладення зусилля проковки на стадії гальмування обертання при технології комбінованого ЗТ дозволяє інтенсифікувати деформацію приконттактних об'ємів металу і мінімізувати формування структурної неоднорідності у різнорідних з'єднаннях. Розроблено технологічні засади мінімізації структурної неоднорідності при ЗТ різнорідних ЖНС і при ЗТ сплавів на основі алюмініду титану γ -TiAl із сплавом ВТЗ-1 і сталями мартенситного (40Х9С3) і аустенітного (ЕП303) класів.

Кириченко І.О. Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля, Київ
Воронцов Б.С. Національний технічний університет
України "Київський політехнічний інститут
імені Ігора Сікорського", Київ

СЕРТИФІКАЦІЯ І СТАНДАРТИЗАЦІЯ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Одним із головних зовнішньополітичних пріоритетів України є євроінтеграція. Утворюється ефективна платформа для співпраці в рамках Східного партнерства для покращення транспортних сполучень між Європейським Союзом та його сусідами, одним із яких є Україна. Необхідність збільшення ефективності і зниження собівартості перевезень приводить до застосування нових технологій і розвитку широкої залізничної мережі.

У країнах ЄС існували значні розбіжності в процедурах підтвердження безпечності виробів та послуг, це могло бути як заява-декларація, так і сертифікація третьою стороною. Але, у 1985 році була прийнята Директива Ради ЄС про технічну гармонізацію, в якій розмежовується роль основних вимог і стандартів. Основні вимоги обов'язкові на відмінність від вимог стандартів. Причому, якщо стандарт гармонізований, то продукція, виготовлена за цим

стандартом, вважається відповідною основним вимогам. У цьому зв'язку процедура контролю для виробника полегшується. Якщо продукція виготовлена не за гармонізованим стандартом, а відповідно до основних вимог, то необхідним є підтвердження відповідності третьою стороною.

Подальша розбудова та поглиблення взаємовідносин між Україною та ЄС, що здійснюються на принципах політичної асоціації та економічної інтеграції, сприятиме впровадженню кращих європейських стандартів у сфері інтермодальних перевезень.

Комплексний підхід наближує перехід до взаємного визнання результатів сертифікації при умові компетентності, високого технічного оснащення і відкритості. Для створення режиму відкритості пропонується забезпечити доступ всіх зацікавлених сторін до інформації про вимоги стандартів, методи випробування, вимоги безпечності виробів.

Створений Комісією ЄС банк даних "Сертифікат" містить інформацію про всі існуючі в Європі системи сертифікації, методики випробувань, лабораторії і випробувальні центри тощо.

Посилюється увага до випробувальних лабораторій в країнах-членах ЄС. Підтримуються тенденції до розвитку національних систем акредитації на базі європейських стандартів і до співпраці в цій області.

Комплексний підхід передбачає нову законодавчу процедуру сертифікації і випробувань, згідно з якою в законодавчі норми ЄС не допускається включення однієї обов'язкової методики сертифікації конкретного виробу або послуги. Повинні бути визначені параметри безпечності, які вимагаються, декілька методів їх підтвердження, умови застосування цих методів. Обмежується також втручання державних органів у діяльність незалежних центрів, за винятком випадків крайньої необхідності.

Оцінюється на відповідність розробка продукції (проектування, дослідний зразок, виробництво); вид контролю (перевірка документації, випробування дослідного зразка, перевірка системи якості тощо); контролюючий орган (виробник, незалежна організація, третя сторона).

У 1989 р. в ЄС була прийнята Глобальна концепція гармонізації правил з оцінки відповідності.

Відомо, що сертифікація – це процедура, за допомогою якої третя сторона дає письмову гарантію, що продукція, процес або послуга, наприклад послуга перевезення, відповідає заданим вимогам.

Але, з 01.01.2016 року в Україні було скасовано обов'язкову сертифікацію на 16 категорій товарів. А з 10.02.2016 р. в Україні вступив закон «Про технічне регулювання та оцінку відповідності», тобто, якщо є технічний регламент на продукцію або на послугу, то проводиться не сертифікація, а оцінка відповідності цьому технічному регламенту. Технічні регламенти в нашій країні приймаються на рівні державних законів і затверджуються постановою кабінету міністрів України.

Цей Закон визначає правові та організаційні засади підтвердження відповідності продукції, систем якості, систем управління якістю, систем управління довкіллям, персоналу та спрямований на забезпечення єдиної державної технічної політики у сфері підтвердження відповідності. Законом передбачено гармонізацію національних нормативно-правових актів з підтвердження відповідності з міжнародними та європейськими. Процедура підтвердження відповідності сфері є обов'язковою для виробника, постачальника чи уповноваженого органу з сертифікації. Наразі в Україні ведеться дуже велика робота по гармонізації національних стандартів до міжнародних, та європейських директив.

Для підтвердження заданого рівня безпечного функціонування інфраструктури залізничного транспорту (системи управління окремої функції інфраструктури залізничного транспорту) та її елементів під час експертизи проекту (змін до проекту) та при прийманні і введенні їх в експлуатацію перевіряється відповідність розроблених технічних (програмно-технічних) рішень затвердженому завданню на виконання проектних робіт, наявність погоджень відповідних органів виконавчої влади, повноваження яких визначено Кабінетові Міністрів України та документації, що доказує безпечність технічного рішення.

Наразі в Україну з країн Європейського союзу перевозиться широкий спектр вантажів для забезпечення життєдіяльності населення та економіки країни. Це і дизельне паливо, бензин, генератори, трансформатори, гуманітарні вантажі, медикаменти, будівельна техніка, хімічна продукція, військові вантажі. Тому дуже важливим при інтермодальних перевезеннях вантажів з ЄС до України є питання стандартизації та сертифікації, які вирішуються шляхом гармонізації українських норм із європейськими (EN, ISO, TSI), що забезпечує сумісність транспортних систем і безпечне переміщення вантажів. При цьому застосовуються спрощені або прискорені процедури сертифікації для критично важливих вантажів, з одночас-

ним дотриманням базових вимог безпеки, якості та технічної відповідності.

Таким чином, ефективність нормативно-правової бази залежить не лише від формального дотримання вимог, а й від розвитку системного моніторингу технічного стану інтермодальних транспортних одиниць, забезпечення високого рівня підготовки фахівців, впровадження сучасних засобів контролю та комунікацій, а також координації між залізничними адміністраціями України та країн ЄС. Гармонізація стандартів, у тому числі для залізничних перевезень, забезпечує підвищення рівня безпеки та покращення інтеграції України в транспортно-європейський простір.

*Клименко Г.П., Рева Є.С., Захаров Є.О.,
Чумаченко В.П.* Донбаська державна
машинобудівна академія, Краматорськ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ НА ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ

У сучасних умовах машинобудівного виробництва підвищення ефективності використання різального інструменту є однією з ключових задач, що безпосередньо впливає на економічні показники підприємств та якість обробки деталей. Оцінка техніко-економічного рівня експлуатації інструменту дозволяє вирішувати широкий спектр практичних завдань, зокрема здійснювати порівняння різних виробництв, обґрунтовувати вибір інструментального оснащення, удосконалювати діяльність інструментальних служб і систем технічного контролю. Рівень експлуатації різального інструменту визначається комплексом показників, що характеризують процес його використання, при цьому ефективність значною мірою залежить від якості самого інструменту та умов його застосування.

Для оцінювання рівня експлуатації інструменту застосовано кваліметричний підхід, який передбачає розгляд процесу експлуатації як об'єкта з визначеним рівнем якості. При цьому показники оцінювання умовно поділяються на абсолютні, відносні, питомі, нормативні та узагальнені. Найбільш інформативним є узагальне-

ний показник – коефіцієнт використання ресурсу інструменту, що відображає ступінь використання його потенціалу.

Разом із тим, використання лише цього показника не дозволяє виявити причини змін ефективності, тому доцільним є застосування системи часткових показників, що характеризують окремі аспекти експлуатації. Розроблена ієрархічна структура властивостей, які формують якість експлуатації інструменту.

Кількісна оцінка рівня якості здійснюється шляхом порівняння фактичних значень показників із базовими (нормативними), що дозволяє визначити ступінь відповідності реальних умов експлуатації встановленим вимогам. Визначення фактичних значень показників базується на даних інформаційних банків, результатах статистичних досліджень, експертних оцінках і лабораторних експериментах. Аналіз отриманих даних показав наявність тісного кореляційного зв'язку між рівнем експлуатації інструменту та його фактичними витратами, причому коефіцієнт кореляції становить близько 0,82. Це свідчить про суттєвий вплив організаційних і технологічних факторів на ефективність використання інструменту.

Встановлено, що відхилення умов експлуатації від нормативних призводить до зміни фактичного витрачання інструменту порівняно з нормативним значенням. Особливо це проявляється при роботі на важких токарних верстатах, де збільшення типорозміру обладнання супроводжується зростанням впливу експлуатаційних факторів, що пояснюється підвищеним розсіюванням параметрів процесу та впливом організаційних і ергономічних чинників. Відповідні залежності наведені на рис. 1.

Особливу увагу в роботі приділено дослідженню стійкості різального інструменту та ймовірності його руйнування. Встановлено, що для важких токарних верстатів характерною є значна варіація періоду стійкості інструменту, коефіцієнт якої може досягати 1,2, а також високий відсоток відмов, пов'язаних із викришуванням і полонками різальних пластин, який сягає 75%. Показано, що різні фактори по-різному впливають на характер відмов: швидкість різання переважно визначає інтенсивність зношування, тоді як подача значною мірою впливає на ймовірність руйнування інструменту. Крім того, на процес експлуатації істотно впливають так звані випадкові відмови, зумовлені дефектами виготовлення інструменту або помилками обслуговуючого персоналу.

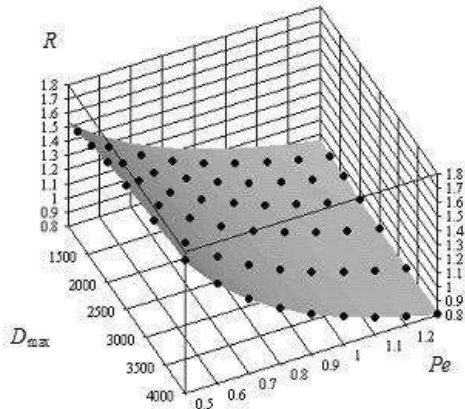


Рис. 1 – Вплив рівня якості експлуатації різального інструменту Pe на зміну фактичного витрачання інструменту R відносно нормативного R_n для важких токарних верстатів різних типорозмірів D_{max}

Для врахування зазначених факторів розроблено підхід до коригування періоду стійкості інструменту, який передбачає введення поправочних коефіцієнтів, що враховують імовірність руйнування та рівень надійності інструменту. Додатково враховується розсіювання періоду стійкості, що дозволяє підвищити точність прогнозування ресурсу інструменту.

Таким чином, запропонований кваліметричний підхід до оцінювання рівня експлуатації різального інструменту дозволяє комплексно враховувати вплив технологічних, організаційних та випадкових факторів. Результати дослідження підтверджують, що підвищення рівня експлуатації інструменту забезпечує зниження його витрат і підвищення ефективності виробництва. Розроблені методичні положення можуть бути використані при створенні систем підтримки прийняття рішень для оптимізації режимів різання та управління інструментальним господарством підприємств машинобудівної галузі.

*Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан.,
Чумак А.С., Копейкіна М.Ю.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Камчатна-Степанова К.В. Національний
технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», Харків

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ ІЗ PсBN

Дане дослідження спрямоване на встановлення основних параметрів механіки контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом, які в подальшому можуть бути використані для аналітичних розрахунків при оптимізації процесу різання виробів з загартованої сталі інструментом з PсBN.

Чисельне моделювання виконувалося у програмному середовищі DEFORM-2D у постановці задачі плоскої деформації. Граничні умови моделі: товщина зрізу 0,05 мм, швидкість переміщення моделі заготовки розміром 3×0,2 мм – 100 м/хв. Геометрія інструмента задавалася такими параметрами: передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$, радіус округлення різальної кромки $\rho = 10$ мкм. Трибологічна взаємодія на контактних поверхнях врахована за допомогою моделі зовнішнього тертя з постійним коефіцієнтом тертя $f = 0,35$.

Проведене 2D-моделювання процесу різання показало, що моделі, параметри яких не враховують механізм локалізації пластичної деформації та руйнування матеріалу, формують переважно зливну стружку. При цьому отримані розрахункові значення сил різання виявляються завищеними порівняно з експериментальними даними, а також спостерігається значне перевищення товщини стружки та довжини її контакту з передньою поверхнею інструменту.

Встановлено, що для адекватного відтворення процесу формування сегментної стружки, характерної для обробки загартованих сталей, необхідно використовувати критерій руйнування, який дозволяє видаляти з розрахункової сітки елементи, для яких перевищено граничне значення параметра пошкодження. Одним із таких критеріїв є критерій Броззо (Brozzo), що описує умову руйнування як функцію найбільшого головного напруження та гідростатичного напруження.

Порівняння форми стружки, а також розрахованих параметрів контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом (довжини контакту, товщини стружки, інтенсивності пластичної дефо-

рмації та сил різання) з експериментально встановленими значеннями показало, що найбільш достовірні результати отримуються при значенні параметра критерію руйнування Броззо $D = 0,15$. У цьому випадку спостерігається формування сегментної стружки, морфологія якої найбільш близька до експериментально отриманої.

Моделювання проводилося з використанням емпіричної конститутивної моделі матеріалу Джонсона–Кука, параметри якої для загартованої сталі AISI 52100 (аналог ШХ-15) наведені у роботі [1]. Використання даної моделі дозволяє врахувати вплив швидкості деформації, температури та накопиченої пластичної деформації на напружено-деформований стан матеріалу в зоні різання.

Отримані результати підтверджують, що коректний вибір параметрів моделі руйнування є одним із ключових факторів забезпечення адекватності чисельного моделювання процесу різання загартованих сталей. Це дозволяє більш точно прогнозувати параметри контактної взаємодії, сили різання та характер формування стружки, що є важливим для подальшої оптимізації режимів обробки та підвищення ефективності використання інструменту з PсBN.

Література

1. Huang Y. Predictive modeling of tool wear rate with applications to cBN hard turning: PhD dissertation. Georgia Institute of Technology, Georgia, 2002.

*Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В.,
Пономаренко О.В., Підгорний М.І.* Донбаська
державна машинобудівна академія, Краматорськ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМОНТУ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Сучасні важкі металорізальні верстати, зокрема токарні комплекси для обробки великогабаритних деталей, працюють в умовах значних навантажень і підвищених вимог до точності. Це обумовлює необхідність застосування нових підходів до їх ремонту, які базуються не лише на відновленні геометрії, але й на аналізі напружено-деформованого стану та динамічної поведінки системи.

Як показано у дослідженні, статичні та динамічні характеристики визначають вантажопідйомність, точність і стабільність роботи важких верстатів.

Конструкція важкого токарного верстата включає станину, шпиндельну бабку, задню бабку та супорт, які спільно забезпечують обробку заготовок масою до 60 т. Під дією власної ваги та технологічних навантажень у системі виникають деформації, що призводять до похибок обробки. Статичну жорсткість верстата доцільно оцінювати за співвідношенням

$$k_s = R/\delta,$$

де R – реакція опори, δ – відповідна деформація.

Аналіз показує, що при роботі з важкими заготовками прогини можуть досягати десятків мікрометрів, причому максимальні деформації спостерігаються в середній частині заготовки та в зоні шпиндельної і задньої бабок (рис. 1). Це свідчить про нерівномірний розподіл жорсткості системи та необхідність її відновлення під час ремонту.

Важливою складовою ремонту є врахування контактної жорсткості вузлів, зокрема підшипникових опор шпинделя. Взаємодія контактуючих поверхонь описується залежністю типу Герца:

$$Q = k_h \cdot \delta^{3/2}$$

де Q – контактна сила, δ – локальна деформація, k_h – коефіцієнт, що залежить від матеріалів і геометрії.

Відповідно, контактна жорсткість визначається як

$$k_n = \frac{dQ}{dq} = \frac{3}{2} k_h \delta^{1/2}.$$

Ці співвідношення дозволяють оцінити стан підшипникових вузлів і визначити необхідність їх заміни або регулювання при ремонті.

Динамічні характеристики верстата визначаються його власними частотами та формами коливань. Важкі верстати характеризуються низькочастотними коливаннями (порядку 20–80 Гц), які формуються масивними вузлами – шпиндельною бабкою, задньою бабкою та заготовкою. Динамічну жорсткість системи можна оцінити через частотну характеристику:

$$k_d(\omega) = F(\omega)/x(\omega),$$

де $F(\omega)$ – збуджуюча сила, $x(\omega)$ – амплітуда переміщення.

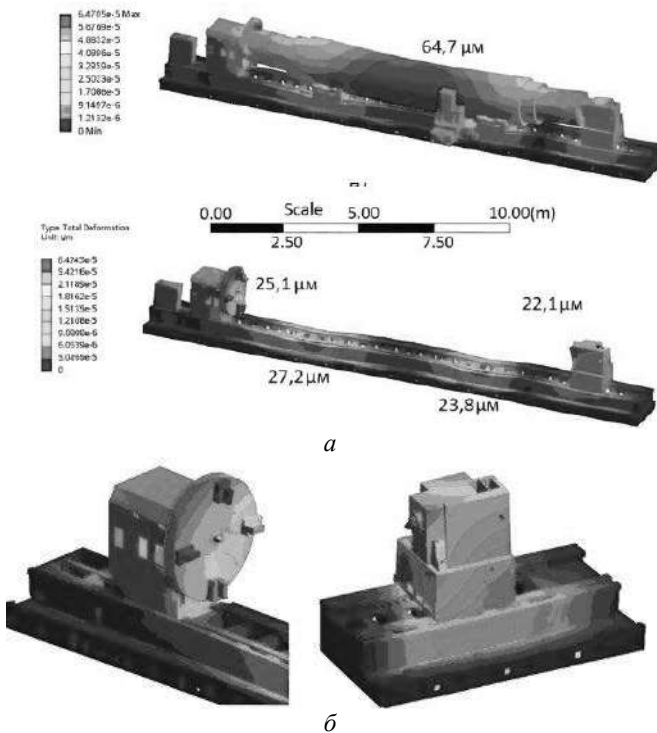


Рис. 1 – Схема деформації важкого верстата під навантаженням:
a – деформована форма верстата; *б* – деформації в різних точках верстата

Узагальнена динамічна модель системи «верстат–заготовка» свідчить, що основний вплив на коливальний процес мають масивні вузли – шпиндельна бабка, задня бабка та оброблювана деталь. Встановлено, що при зниженні жорсткості окремих елементів відбувається зменшення власних частот системи та зростання амплітуд коливань, що підвищує ймовірність виникнення резонансних режимів. Динамічна жорсткість системи визначається співвідношенням між збуджуючими силами та відповідними переміщеннями і є функцією частоти, що дозволяє оцінити вібростійкість верстата в робочому діапазоні. Отримані результати підтверджують, що при ремонті важких верстатів необхідно враховувати не лише статичні характеристики, але й динамічну поведінку системи, забезпечуючи підвищення жорсткості та демпфуючих властивостей основних вузлів для запобігання небезпечним коливанням.

Аналіз показує, що зниження жорсткості окремих вузлів призводить до зменшення власних частот і підвищення ймовірності ре-

зонансних явищ. Тому при ремонті необхідно забезпечувати підвищення жорсткості конструкції та покращення демпфуючих властивостей. Це досягається шляхом відновлення напрямних, посилення станини, модернізації підшипникових вузлів і оптимізації кріплень.

Запропонований підхід до ремонту базується на комплексному аналізі статичних і динамічних характеристик. Він включає визначення деформацій, оцінку жорсткості вузлів, аналіз власних частот і розробку заходів щодо їх підвищення. Такий підхід дозволяє не лише відновити геометричну точність, але й забезпечити стабільність роботи верстата в умовах важкого точіння.

Практична реалізація методики дозволяє підвищити точність обробки, зменшити вібрації та збільшити ресурс обладнання. Таким чином, використання методів аналізу напружено-деформованого стану та динаміки є ефективною основою для сучасного ремонту важких верстатів.

Ковальов В.Д., Міхеев А.О. Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕРТЯ В НАПРЯМНИХ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ ПРИ РЕМОНТІ ТА ВІДНОВЛЕННІ

У процесі експлуатації важких металорізальних верстатів значна частина відмов і зниження точності обробки пов'язана зі зношуванням напрямних, які працюють в умовах граничного та змішаного тертя. Особливої актуальності ця проблема набуває при ремонті та відновленні обладнання, коли змінюються геометричні та трибологічні характеристики контактуючих поверхонь. У цих умовах забезпечення стабільності процесу тертя є визначальним фактором підвищення точності та довговічності верстатів.

Нестабільність тертя в напрямних обумовлена нелінійною залежністю сили тертя від швидкості ковзання, а також зміною контактної деформації поверхонь. При малих швидкостях подачі виникають фрикційні автоколивання, що можуть мати релаксаційний характер і супроводжуватися стрибкоподібним рухом супорта. Для одномасової системи критична швидкість, нижче якої виникає нестійкий рух, може бути оцінена залежністю:

$$v_{кр} = \frac{\Delta F}{\sqrt{\psi \cdot c \cdot m}},$$

де $\Delta F = F_{п} - F_{д}$, c – жорсткість приводу, m – маса рухомого вузла, $\psi = 2 \cdot \pi \cdot \xi$ – відносне розсіювання енергії при коливаннях.

Підвищення плавності переміщень досягається шляхом збільшення жорсткості системи, стабілізації сил тертя та введення додаткового демпфування. Рух подвижного вузла з урахуванням демпфування, пропорційного швидкості, може бути описаний рівнянням:

$$\Delta F - c \cdot (x - v \cdot t) = m \cdot \ddot{x} + h \cdot (\dot{x} - v),$$

де h – коефіцієнт демпфування, c – жорсткість системи, F – зовнішня сила.

Для реалізації керованого демпфування запропоновано використання активного демпфера, який дозволяє адаптивно змінювати характеристики системи залежно від умов роботи. Пристрій являє собою гідромеханічну систему з елементами автоматичного керування (рис. 1). До його складу входять насос, фільтр, редукційний клапан, гідроциліндр, а також датчики швидкості переміщення та сили різання.

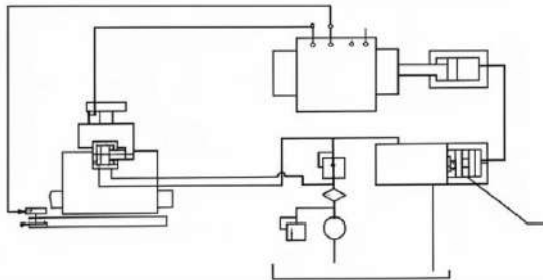


Рис. 1 – Активний демпфер

Насос забезпечує подачу робочої рідини в систему, яка через фільтр очищується та надходить до регульовального вузла. Редукційний клапан стабілізує тиск у системі, підтримуючи необхідний режим роботи. Основним виконавчим елементом є гідроциліндр, встановлений у приводі супорта, який виконує функцію активного демпфера. Система керування працює за принципом зворотного зв'язку. Датчики швидкості та сили різання фіксують зміну параметрів процесу та формують сигнали, які впливають на

регулювальні органи гідросистеми. Зміна керуючого впливу призводить до зміни тиску в робочих порожнинах гідроциліндра, що, у свою чергу, змінює силу демпфування.

Принцип дії пристрою полягає в адаптивному регулюванні демпфувальної сили. При виникненні автоколивань або нерівномірності руху система автоматично збільшує демпфування, що забезпечує їх пригнічення. При стабільному русі демпфування зменшується, що дозволяє знизити енергетичні втрати. Таким чином забезпечується оптимальний режим роботи приводу супорта.

Додатковим ефектом застосування активного демпфера є покращення умов змащування контактних поверхонь. Наявність керованих мікроколивань сприяє формуванню стабільної мастильної плівки, що зменшує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування. Це особливо важливо для відновлених напрямних, поверхневий шар яких має змінені властивості.

Застосування запропонованого пристрою дозволяє забезпечити рівномірність переміщень супорта при малих швидкостях подачі (менше 0,2 мм/хв), підвищити точність обробки та зменшити вібрації. Особливо ефективним є його використання при ремонті та модернізації важких верстатів, де необхідно компенсувати відхилення характеристик відновлених вузлів.

Таким чином, впровадження активного демпфування дозволяє реалізувати принцип керованого тертя в напрямних та суттєво підвищити експлуатаційні характеристики важких металорізальних верстатів.

*Кусий Я.М., Кусень Н.А., Климаш І.В.,
Брухаль П.Р., Конюх О.І.* Національний
університет «Львівська політехніка», Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ РІЗЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ

Сучасний розвиток машинобудівного виробництва характеризується зростанням вимог до надійності, довговічності та стабільності параметрів деталей, які працюють в умовах інтенсивних навантажень та агресивних середовищ. Умови сучасного машинобудування зумовлюють потребу не лише у вдосконаленні окремих

операцій формоутворення, але й у комплексному дослідженні технологічних систем і середовищ, до складу яких входять устаткування, технологічне оснащення, інструмент, заготовка та сукупність керуючих впливів. Такий підхід особливо важливий для процесів вібраційної обробки, у яких кінцевий результат формується внаслідок нелінійних коливальних процесів, стохастичних контактних взаємодій та динамічної чутливості системи до збурень. Відтак, традиційні методики оцінювання працездатності та стабільності технологічних процесів часто виявляються недостатніми [1, 2].

Фінішне оброблення методами поверхневого пластичного деформування (ППД) у поєднанні з вібраційним впливом належить до високоефективних технологій, що ефективно застосовують для зміцнення виробів із концентраторами напружень, зокрема різевих поверхонь відповідальних деталей (ходових гвинтів, силових болтів тощо) (рис. 1) [3].

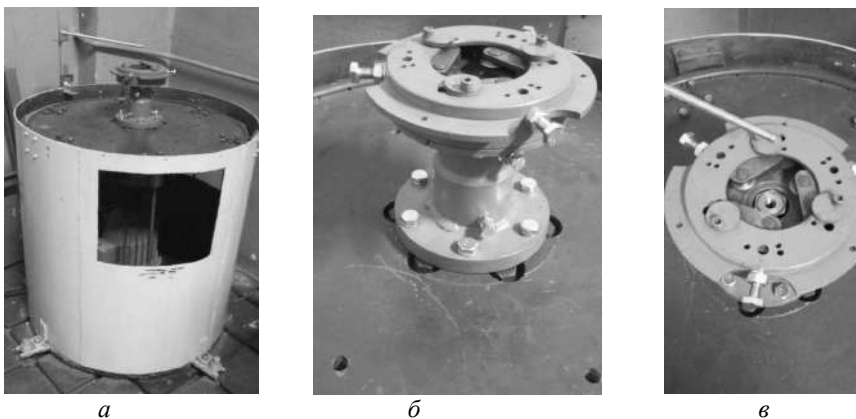


Рис. 1. Технологічне середовище: а – вібраційна машина, б – пристрій, в – деформівні елементи № 1–3 для вібраційно-відцентрового зміцнення

В умовах цифрового машинобудування, коли жорстко підвищуються вимоги до основних параметрів якості виробів та суттєво скорочується час на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва, методи інженерії надійності відіграють домінуючу роль у технологічному забезпеченні основних параметрів деталей і машин. Збільшення номенклатури виробів поряд із зростанням технічних вимог вимагає удосконалення існуючих, розроблення нових методик інженерії надійності і їхнє впровадження у практику технології машинобудування [4].

Ланцюги Маркова як важлива складова сучасної інженерії надійності широко використовують у різних галузях народного господарства для прогнозування надійності технічних систем різного ступеня складності. Поряд з тим, широке використання даної методики у практику машинобудівного виробництва гальмується складністю та неоднозначністю встановлення інтенсивностей відмов для компонентів технологічних систем механічного оброблення [5].

Методика ланцюгів Маркова апробована для технологічної операції 015 Вібраційно-відцентрова (табл. 1) для технологічного маршруту оброблення силових болтів із використанням елементів технологічного середовища, приведених на рис. 1 [6]. Технологічний граф надійності для операцій 015 приведено на рис. 2.

Таблиця 1 – Технологічне забезпечення фінішної операції зміцнення різевих поверхонь силових болтів

№ та назва операції	Елементи технологічного середовища			Основний (машинний) час, хв	
	технологічне обладнання	технологічне оснащення	елемент деформівний	по переходу	по операції
015 Вібраційно-відцентрова	Машинна вібраційна	Пристрій універсальний	Три деформівні ролики	10	10

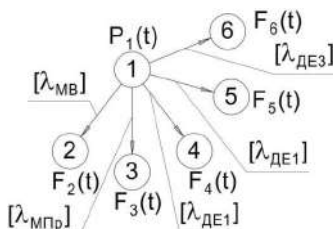


Рис. 2 – Технологічний граф надійності для технологічної операції 015

На рис. 2 позначено $P_1(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 1, що забезпечує досягнення регламентованих параметрів згідно технічних вимог стосовно обробки різі силових елементів за умови, що вібраційна машина (або її складові), технологічне оснащення (або його компоненти, жоден із деформівних елементів – роликів № 1–3 не ввійдуть у граничний стан; $F_2(t)$, $F_3(t)$, $F_4(t)$, $F_5(t)$, $F_6(t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих показників виробу за умови досягнення граничного стану вібраційною машиною (або її складовими), технологічним оснащенням (або

його компонентами), деформівними елементами – роликками № 1–3 відповідно; $\lambda_{\text{МВ}}$, $\lambda_{\text{МПР}}$, $\lambda_{\text{ДЕ1}}$, $\lambda_{\text{ДЕ2}}$, $\lambda_{\text{ДЕ3}}$ – інтенсивність відмов відповідно машини вібраційної, технологічного оснащення та деформівних елементів – роликів № 1–3.

Гамма-відсоткове напрацювання на відмову $P(t_\gamma)$, як важливий показник безвідмовності характеризує основний час, протягом якого відмова об'єкту не відбудеться із ймовірністю $P(t_\gamma) = 1,0; 0,99; 0,95; 0,90; 0,80; 0,50$. Значення $P(t_\gamma) = 1,0; 0,99; 0,95; 0,90$ прийнятні для оцінювання технічного стану нових машин і їхніх деталей. Значення $P(t_\gamma) = 0,80; 0,50$ дозволяють аналізувати параметри відновлених деталей [6].

Після складання та розв'язку системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності (рис. 2) за прийнятих значень $\lambda_{\text{МВ}} = 8,22 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$; $\lambda_{\text{МПР}} = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$; $\lambda_{\text{ДЕ1}} = \lambda_{\text{ДЕ2}} = \lambda_{\text{ДЕ3}} = 2,47 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ після підстановки значення часу для операції 015 ($t = 10$ хв), отримуємо $P_1(t) = 0,999842$; $F_2(t) = 0,000014$; $F_3(t) = 0,000021$; $F_4(t) = 0,000041$; $F_5(t) = 0,000041$; $F_6(t) = 0,000041$.

Отримані результати свідчать, що для даної технологічної операції за умови використання технологічної системи/ середовища, приведених на рис. 1, для $P_1(t) = 0,999842$ забезпечуються регламентовані значення гамма-відсоткового напрацювання на відмову $P(t_\gamma) = 0,99; 0,95; 0,90; 0,80; 0,50$.

Розроблену методику прогнозування поведінки елементів технологічної системи та середовища вібраційно-відцентрового зміцнення поверхневим пластичним деформуванням буде адаптовано для ширшої номенклатури деталей і для інших методів формоутворення поверхонь виробів.

Література

1. Psarommatis F., Bravos G. A holistic approach for achieving sustainable manufacturing using zero defect manufacturing: a conceptual framework // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 107–112.
2. Sharma S., Singh T., Dvivedi A. *Advancements in machining processes through hybrid and sequential approaches*. 1st edn. Boca Raton: CRC Press, 2025. P. 170.
3. Кусий Я. М. Дослідження впливу викінчувальних операцій на формування параметрів якості поверхні втулок бурових pomp // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. № 2. С. 14–22.

4. Dui H. (Ed.), Wu S. (Ed.). Importance-informed reliability engineering. Cham: Springer, 2024.

5. Бобало Ю. Я., Волочий Б. Ю., Лозинський О. Ю. та ін. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013.

6. Kusyi Y., Stupnytsky V., Onysko O., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Optimization synthesis of technological parameters during manufacturing of the parts // Maintenance and Reliability. 2022. Vol. 24, No. 4. P. 655–667.

*Кусков Ю.М., Нетяга А.В., Проскудін В.М.,
Римар С.В., Лентюгов І.П., Окопнік Л.Л.,
Осін В.В.* Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІВДІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ БІМЕТАЛЕВИХ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОВШІВ КАР'ЄРНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено спосіб електрошлакового наплавлення (ЕШН) і обладнання для нього – струмопідвідний кристалізатор (СПК) [1–3]. СПК є секційним водоохолоджувальним невитратним пристроєм, до верхньої секції якого й до виробу, на який наплавляється метал, підведена напруга від джерела живлення. Верхня секція має вертикальний поздовжній розріз і подібна до індуктора. В ній обертається розплавлений шлак. Не розрізна нижня секція слугує для утримання під шаром флюсу розплаву металу і формування його наплавленого шару на виріб. Пристрій дозволяє використовувати для наплавлення як електроди великого поперечного перерізу, так і дискретні металеві гранули, або рідкі присадки. Пристрій забезпечує електромагнітне обертання шлакової ванни в горизонтальній площині, завдяки чому покращується структура металу, що наплавляється і створюються умови рівномірного проплавлення основного металу.

Теоретичне обґрунтування виникнення обертового руху шлакової ванни достатньо докладно викладено нами для випадку наплавлення в СПК круглого поперечного перерізу [4–6], а практичне підтвердження було отримано під час виконання кільцевого наплавлення циліндричних виробів, зокрема прокатних валків діаметром від 250 до 1500 мм.

Наступним етапом розвитку цієї технології наплавлення стало отримання біметалевих армуючих елементів шляхом нанесення на торцеві поверхні сталевих заготовок діаметром 70–200 мм зносостійких чавунних шарів товщиною 10–40 мм. Застосування такого типу елементів, які з'єднуються за допомогою зварювання їх сталевій основі з робочою поверхнею виробу дозволяє суттєво підвищити його довговічність. В цьому випадку електромагнітний вплив на шлакову ванну відбувається аналогічно тому, що спостерігається в разі кільцевого ЕШН.

У випадку зміни форми формуючої секції СПК з круглої на квадратну принцип виникнення електромагнітних сил і їх дія залишається незмінною. Однак, перетворення внутрішньої поверхні секції з кільцевої рівномірно-безперервної у ламану, особливо на кутових ділянках з'єднання граней змінює і характер руху шлакової ванни. Дійсно, поведінка шлакової ванни в цьому випадку має свої особливості. Найбільша сила, що діє на шлакову ванну спостерігається на грані верхньої секції кристалізатора, де розташований струмопідвід і де зростає прискорення руху шлаку. Після проходження першого кутового з'єднання граней прискорення продовжується до наступного кута перетину граней. В подальшому відбувається зниження швидкості руху потоку шлаку і в наступних двох кутах навіть утворюються невеликі мало швидкісні локальні вихорі із слабо вираженим обертанням. Тим не менш така поведінка руху шлакової ванни по периметру секції за правильно підібраних технологічних режимів суттєво не впливає на рівномірність пропалвлення основного металу.

На рис. 1, *а* показано процес наплавлення у СПК з внутрішнім поперечним перерізом 200×200 мм з використанням полого наплавного електрода квадратного поперечного перерізу 120×120 мм високохромистого чавуну на сталеву поверхню, а на рис. 1, *б* – отриманий біметалевий армуючий елемент у вигляді плитки, розрізаній навпіл, з товщиною наплавленого шару чавуну біля 30 мм.

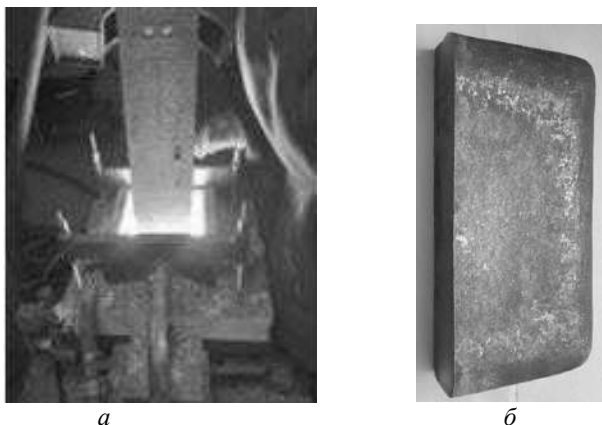


Рис. 1 – Процес наплавлення металу з використанням СПК квадратного поперечного перерізу із застосуванням полого наплавного електрода квадратного поперечного перерізу (а), наплавлений біметалевий армуючий елемент, розрізаний навпіл (б)

Одним із успішних прикладів застосування біметалевих армуючих елементів було відновлення високовартісного ковша кар'єрного навантажувача «CATERPILLAR» ємністю 15 м³, виготовленого із високоміцної сталі.

Передня стінка ковша навантажувача була суттєво зношена і потребувала заміни під час ремонту. Застосування технології зміцнення зношеної частини приварюванням на неї армуючих елементів значно здешевило ремонтні роботи. До основної передньої частини ковша були приварені сталеві елементи у вигляді плиток, на нижній, сильно навантаженій частині ковша – більш міцні біметалеві елементи.

Оскільки до зношеної нижньої поверхні необхідно було приварювати досить вузькі елементи, наплавлені біметалеві заготовки були розрізані навпіл за допомогою технології водяного різання. Таким чином отримано 30 біметалевих плиток розміром 100×200 мм. Їхнє розташування на нижній частині ковша після приварювання електродами показано на рис. 2, а, на якому область розміщення плиток (жовтого кольору) виділена червоною лінією. Вище цих плиток на поверхні ковша розташовані великі плитки (сірого кольору) зі зносостійкої сталі, приварені для захисту всієї передньої поверхні стінки ковша.

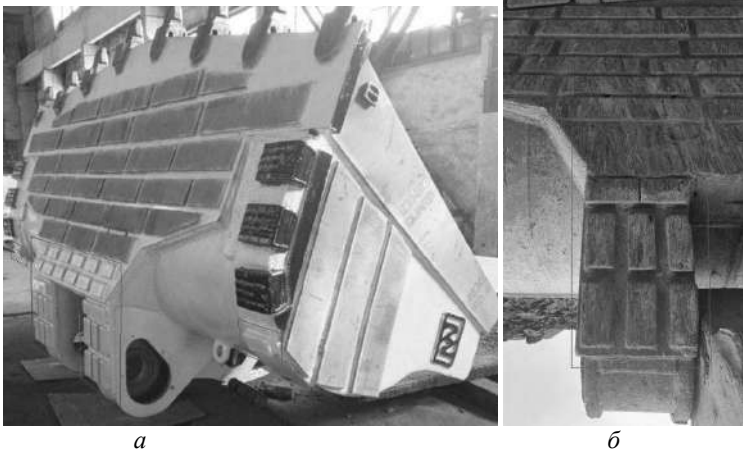


Рис. 2 – Передня частина ковша із привареними армуючими елементами (а); ліва сторона зношеної поверхні ковша (б)

Як показали результати інтенсивної експлуатації ковша протягом 3 місяців вертикально розташовані біметалеві плиткі мають незначне зношування, рис. 2, б. Плиткі, які розташовані горизонтально в верхній зоні, яка піддається найбільшому тертю, були зношені повністю і виявилися надійним бар'єром від подальшого зношування великих плиток зі зносостійкої сталі, які мало змінили свою товщину. Тому, в цьому разі, варто замінювати лише зношені плиткі.

Досвід експлуатації ковша навантажувача показав, що його довговічність значно збільшена завдяки приварюванню на його передню поверхню армуючих елементів, з можливою їх періодичною заміною. Таким чином, на практиці підтверджена можливість отримання якісних високоміцних біметалевих армуючих елементів квадратного поперечного перерізу методом ЕШН у СПК для виробів різного призначення.

Література

1. Ксендзык Г. В. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны // Специальная электрометаллургия. 1975. № 27. С. 32–40.
2. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Ус В. И., Томиленко С. В. Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля // Проблемы спецэлектрометаллургии. 1989. № 4. С. 3–7.

3. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. А. Электрошлаковая наплавка. Москва: Наука и технологии, 2001. 180 с.

4. Гориславец Ю. М., Бондар О. І., Проскудін В. М., Кусков Ю. М., Римар С. В., Нетяга А. В. Моделювання електромагнітних процесів в секційному струмопідвідному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу // Технічна електродинаміка. 2022. № 4. С. 64–68.

5. Гориславец Ю. М., Бондар О. І., Проскудін В. М., Кусков Ю. М., Римар С. В., Нетяга А. В. Вплив струмопідводу на електромагнітні процеси в кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу // Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2022. Вип. 62. С. 19–24.

6. Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Нетяга А. В., Римар С. В. Електрошлакове наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі шайб високохромистого чавуну на сталевий лист бічної футеровки шокової дробарки // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 25–26 березня 2025 р. Київ: АТМ України, 2025. С. 63–68.

Куць Н.Г. Луцький національний технічний
університет, Луцьк

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ У СУЧАСНОМУ МАШИННОМУ ВИРОБНИЦТВІ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАНДАРТІВ

Інтенсивний розвиток машинного виробництва супроводжується навантаженням на навколишнє середовище. Забруднення атмосфери, повітря, водних ресурсів, ґрунтів технологічними рідинами, утворення промислових відходів і високе споживання енергетичних ресурсів формують комплекс екологічних проблем, що потребують системного вирішення.

У машинному виробництві джерелами забруднення виступають процеси лиття, зварювання, механічної обробки, фарбування та термічної обробки металів. У результаті цих процесів утворюються шкідливі гази, пил, аерозолі, відходи металів, а також промислові стічні води, що містять нафтопродукти та важкі метали. Крім того,

машинобудівні підприємства характеризуються високою енергоємністю виробництва, що спричиняє значні викиди парникових газів і збільшує навантаження на природні ресурси та середовище.

Для мінімізації негативного впливу машинного виробництва на довкілля необхідне впровадження комплексу організаційних, технологічних та інноваційних заходів: використання екологічно чистих маловідходних та безвідходних технологій в автоматизованих виробничих системах, застосування енергоощадного обладнання; застосування відновлюваних джерел енергії, встановлення систем фільтрації, газоочисного обладнання, очисних споруд для промислових стічних вод; рециклінг металів, регенерація мастильних матеріалів, повторне використання технологічних рідин; запровадження систем моніторингу, автоматизованого контролю та управління виробничими процесами з впровадженням міжнародних стандартів екологічного управління; екологічний аудит і контроль впливу виробництва на довкілля.

Одним із ключових шляхів зменшення негативного впливу виробництва на довкілля є впровадження міжнародних стандартів екологічного менеджменту. Найбільш поширеним є стандарт ISO 14001, який встановлює вимоги до системи екологічного управління підприємством. Його застосування дозволяє організаціям системно визначати екологічні аспекти діяльності, контролювати вплив на навколишнє середовище, дотримуватися екологічного законодавства та постійно покращувати екологічні показники виробництва.

Важливим елементом екологізації машинного виробництва є також впровадження стандарту ISO 50001, який регламентує систему енергетичного менеджменту. Метою цього стандарту є підвищення енергоефективності виробництва, зменшення витрат енергії та скорочення викидів парникових газів.

Крім того, у системі екологічного управління широко застосовуються стандарти серії ISO 14000, які включають методи оцінювання екологічної ефективності, аналіз життєвого циклу продукції та моніторинг екологічних показників діяльності підприємства. Такі стандарти допомагають підприємствам оцінювати вплив продукції на довкілля на всіх етапах її життєвого циклу – від видобутку сировини до утилізації.

Практична реалізація стандартів екологічного управління, що наведено в табл. 1, передбачає впровадження ресурсозберігаючих технологій, систем очищення викидів і стічних вод, переробку виробничих відходів, а також використання сучасних цифрових сис-

тем моніторингу екологічних показників, що забезпечує відповідність виробництва міжнародним екологічним вимогам.

Таблиця 1 – Екологічні проблеми машинобудування та стандарти їх вирішення

Екологічна проблема	Джерело виникнення у машинному виробництві	Наслідки для довкілля	Міжнародні стандарти та інструменти
Забруднення атмосферного повітря	Зварювання, лиття, термічна обробка, фарбування	Викиди пилу, оксидів азоту, органічних сполук	ISO 14001 – система екоменеджменту; ISO 14064 – управління викидами газів
Забруднення водних ресурсів	Мастильні та охолоджувальні рідини, промислові стічні води	Потрапляння нафтопродуктів та металів у водойми	ISO 14001; ISO 14046 – оцінка водного сліду
Утворення промислових відходів	Металева стружка, шлами, відпрацьовані мастила	Накопичення токсичних відходів	ISO 14001; принципи циркулярної економіки
Високе енергоспоживання	Робота верстатів, пресів, печей	Збільшення викидів CO ₂ та витрат енергії	ISO 50001 – система енергетичного менеджменту
Шум та вібрація	Робота обладнання та транспортних систем	Вплив на здоров'я працівників	ISO 45001 – система управління охороною праці

Отже, впровадження міжнародних стандартів екологічного та енергетичного менеджменту є важливим інструментом підвищення екологічної безпеки машинного виробництва. Системний підхід до управління екологічними аспектами діяльності підприємств дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля, підвищити ефективність використання ресурсів і забезпечити сталий розвиток промисловості.

Література

1. Бойко О. В. Екологічна безпека промислового виробництва. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 312 с.
2. Трохимчук А. М. Екологізація промислового виробництва в умовах сталого розвитку. Київ: НТУУ «КПІ», 2021. 198 с.

3. ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

4. ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

Лаврінченко В.І., Скрябін В.В. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Солод В.Ю., Музичка В.А. Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське
Проц Л.А. Ужгородський національний університет, Ужгород

СУЧАСНІ РОЗРОБКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІПШЕНИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

Тверді сплави, як ефективний інструментальний матеріал, є відомими вже фактично сторіччя. Разом з тим, вони постійно вдосконалюються у напрямку підвищення їх властивостей. В даній роботі нами зупинена увага на найсучасніших напрацюваннях, які є у наукових публікаціях за 2025 р., і саме на чому роблять наголос нині сучасні дослідники в таких розробках.

Тверді сплави, відомі своєю чудовою твердістю, термічною стабільністю і зносостійкістю, разом з тим, незадовільна оброблюваність обмежує застосування твердих сплавів при виготовленні складних за формою компонентів. Але технологія 3D-друку пропонує нове рішення, що дозволяє виробляти деталі з твердих сплавів зі складною геометрією, скорочувати відходи матеріалів і брак у порівнянні із традиційними методами. Технологія 3D-друку і застосуванням цементованих карбідів, часто звана «адитивним виробництвом», є новаторським процесом, який поєднує підготовку матеріалу і точне формування в пошарову конструкцію складних тривимірних деталей, усуваючи необхідність у формах. На відміну від традиційних методів субтрактивного виробництва, таких як точіння, фрезерування і розточка, де втрати матеріалу можуть перевищувати 25%, а іноді і досягати 90%, 3D-друк із застосуванням

цементованих карбідів значно підвищує коефіцієнт використання матеріалу, що досягає більше 85%. В статті [1] представлений всебічний огляд останніх досягнень в технології 3D-друку твердими сплавами. В ній описуються сировина і методи підготовки, що застосовуються для твердих сплавів, розглядаються принципи і характеристики 3D-друку твердими сплавами і висвітлюються останні технологічні інновації. Крім того, в статті [1] аналізуються металургійні дефекти, які можуть виникнути в процесі друку, і обговорюються різні методи виявлення, а також методи постобробки для 3D-друкованих карбідних підкладок. Насамкінець, в огляді розглядаються майбутні напрямки розвитку 3D-друку з твердих сплавів з урахуванням потенційних тенденцій у виробничих процесах. Зростання нових технологій 3D-друку оживило галузь карбіду вольфраму і посприяло прогресу в різних галузях, таких як аерокосмічна промисловість, біоматеріали, матеріалознавство і буріння нафтових свердловин. Аналіз останніх тенденцій публікацій показує сталий ріст результатів досліджень, що відбиває зростаючий інтерес як з боку академічних кругів, так і з боку промисловості до технології 3D-друку карбідами вольфраму. Ця тенденція підкреслює значний потенціал технології 3D-друку карбідами вольфраму для різних застосувань (рис. 1).

Дослідження [2] присвячене вивченню середньоентропійних карбідів (MEC) і середньоентропійних сплавів (MEA) у якості інноваційних альтернатив твердій фазі WC і зв'язуючій фазі Co у традиційних твердих сплавах. Успішно виготовлена низка нових твердих сплавів, таких як WC-10CoNiFe, WC-10CoNiCr, (NbTaW)C-10CoNiFe і (NbTaW)C-10CoNiCr. Були досліджені мікроструктури і механічні властивості середньоентропійних сплавів, пов'язаних з твердими сплавами (MEACC), і середньоентропійних твердих сплавів (MECC). Результати свідчать, що MEACC, що застосовують MEA у якості зв'язуючої фази, демонструють значно поліпшену в'язкість руйнування і міцність на поперечний розрив у порівнянні із звичайними сплавами WC-10Co. MECC демонструють виключні загальні механічні властивості. Первинними механізмами зміцнення були визначені – подрібнення зерна, зміцнення твердого розчину і унікальні межфазні ефекти. Була продемонстрована реалізація MEC і MEA у якості заміни фаз WC і Co в твердих сплавах, що значно можливості у мікроструктурному проектуванні і оптимізації механічних властивостей спеціальних твердих сплавів. Твердість і в'язкість, які є парою взаємно обмежувальних показників

продуктивності, і часто буває важко звичним методом підвищити твердість, зберігаючи чи поліпшуючи в'язкість. Рис. 2 ілюструє взаємозв'язок між твердістю за Вікерсом і в'язкістю руйнування різних систем твердих сплавів. Видно, що МЕА і МЕС у якості заміників звичайних фаз Co і WC можуть додатково оптимізувати загальні механічні властивості твердих сплавів.

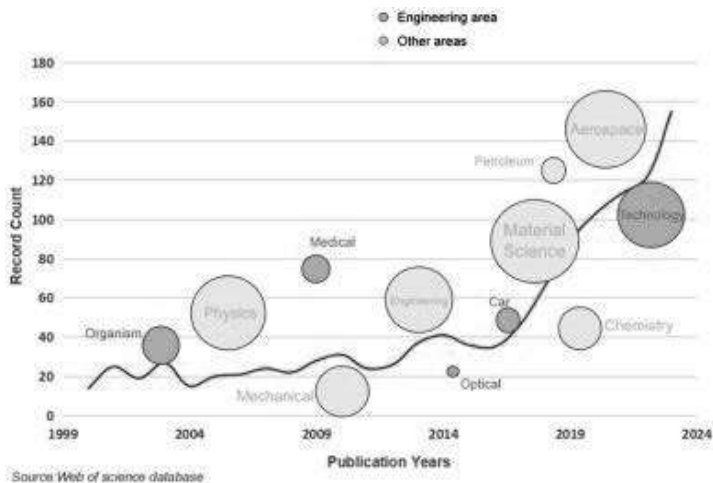


Рис. 1 – 2023 рік по твердим сплавам у різних галузях [1]

Як показано вище, в твердих сплавах компроміс між міцністю і в'язкістю утруднює повне застосування переваг координації двофазних матеріалів. В роботі [3] в твердих сплавах створюється крупно- і дрібнозерниста гетерогенна структура із використанням двох різних вихідних порошків: один з них є гранульованим WC-6Co (середній розмір зерна WC складає 2 мкм), а інший – змішаний порошок WC-4.5Ni-1.5Fe (середній розмір зерна WC складає 7 мкм). Засвідчено, що дрібнозернистий гранульований матеріал, рівномірно впроваджений в крупнозернисту область, має типову сітчасту змішану структуру зерен. Введення гетерогенної структури дозволяє твердим сплавам мати як гарні міцність і в'язкість. Тверді сплави продемонстрували оптимальну відповідність міцності і в'язкості з твердістю 1306 HV, міцністю на поперечний розрив 2957 МПа, в'язкістю руйнування 16,6 МПа·м^{-1/2} відповідно. Ефект зміцнення переважно досягається за рахунок зупинки і відхилення розповсюдження тріщин, що забезпечується більш грубими частинками WC.

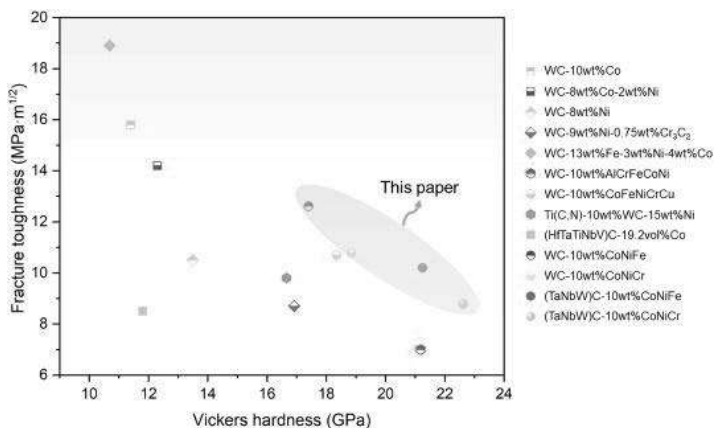


Рис. 2 – Графік залежності твердості від в'язкості руйнування для різних систем твердих сплавів [2]

Разом з тим, і переробка відходів твердих сплавів є актуальним питанням. Окислення має вирішальне значення для відновлення W і Co з лому цементованих карбідів. Для інтенсифікації цього процесу в дослідженні [4] застосовувався мікрохвильовий відпал для ефективного окислення одного з основних карбідів, а саме лома цементованого карбіду WC-8Co. Характеристики окислення карбіду у діапазоні температур від 300 до 800 °C були досліджені термодинамічним і електромагнітним аналізами. Глибина проникнення мікрохвиль, D_p , лому карбіду вольфраму WC-8Co виявився всього 21,14 мм, що вказує на його гарну здатність поглинати мікрохвилі. При підвищенні температури з 300 до 700 °C приріст маси, ефективність окислення і відсоток обезвуглерожування збільшилися з 0,48, 83,73 і 3,35% до 18,74, 98,95 і 98,26% відповідно. Між тим, вміст вуглецю в карбіді знизився з 5,49 до 0,099% за масою. Підвищення температури до 800 °C виявило незначний вплив на окислення. Основні фази, включаючи WC, Co і CoO, у кінцевому підсумку окислилися до WO_3 і $CoWO_4$, що супроводжувалося розширенням елементарної ячейки і утворенням тріщин. У порівнянні із звичним відпалом мікрохвильовий відпал при оптимальній температурі 700 °C привів до зниження залишкового вмісту вуглецю у 4,75 рази. Ці результати продемонстрували перевагу окислення лома карбіду вольфраму WC-8Co за допомоги низькотемпературного мікрохвильового відпалу.

Точна оцінка характеристик зносу інструмента має першорядне значення в цифровому виробництві, оскільки вона напряму впливає

на ефективність обробки, точність і споживання енергії. В дослідженні [5] вивчалася зносостійкість твердосплавних інструментів під час високопродуктивної обробки матеріалів на основі заліза шляхом вивчення характеристик тертя і енергії, присутніх у взаємодії інструмента і стружки. Спочатку був проведений аналіз передачі енергії і кумулятивного розподілу в системі інструмент-заготовка, що привело до пропозиції механізму зносу, який би був тісно зв'язаний з густинами теплової енергії дифузії і потужності енергії тертя. Надалі була досліджена кореляція між густиною кумулятивної енергії і характеристиками зносу в різних областях передньої поверхні. Результати показали наявність третього шару тіла під час процесу і його в'язко-пружні властивості значно вплинули на розподіл навантаження та поведінку ушкодження.

Тобто, основні сучасні напрацювання поліпшення твердих сплавів спрямовані в напрямках їх 3D-друку, застосуванню в них середньоентропійних карбідів та створенню в них крупно- і дрібнозернистої гетерогенної структури.

Література

1. Ma C., Yang T., Tang Y., Zou Z., Ma Z., Cao Y., He J., Chen L., Chen T., Xiong J. 3D printing of cemented carbides: a review of techniques, defects, and post-processing // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 36, May–June. P. 9220–9245.
2. Cai K., Sun J., Cao Z., Li B., Liu B., Fan C. Microstructure and mechanical properties of medium entropy cemented carbides // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 35, March–April. P. 3774–3783.
3. Yang S., Zhu W., Ye N., Zhang F., Jiang J., Zhuo H., Tang J. Realizing superior strength-toughness synergy in cemented carbides with coarse and fine-grained heterostructures // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 36, May–June. P. 3785–3795.
4. Zhang T., Peng Z., Jiang H., Gong Z., Li X., Duan A. Efficient oxidation of scrap WC–8Co cemented carbide by microwave roasting // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 36, May–June. P. 7274–7283.
5. Ma J., Lin Y., Lai D., Wei H., Liu Z. Prediction of tool wearability distribution considering friction and energy characteristics of the cutting process // *Wear*. 2025. Vol. 572–573, 1 July. P. 206028.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СПРЯМОВАНОМУ ВПЛИВІ НА КОНТАКТНІ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ЗМІНИ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ І ЗМЕНШЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ

Актуальним питанням зниження процесів тертя в машинах і механізмах, а також в процесах оброблення, дослідниками приділяється значна увага. Нас, в даному випадку зацікавили основні напрямки досліджень, якими опікуються сучасні дослідники, які є у наукових публікаціях за 2025 р., і саме на чому вони роблять наголос при спрямованому впливові на процес тертя.

Суперзмащуваність може бути реалізована або за рахунок структурного невідповідного контакту між кристалічними поверхнями, або шляхом створення високопасивних поверхонь для нейтралізації адгезійних сил. Але виготовлення і підтримання таких суперзмащуваних поверхонь залишається складною задачею, часто нездійсненою з-за дефектів структури поверхні або сприйнятливості до атмосферного середовища, що робить суперзмащуваність крихкою. В статті [1] пропонується нова стратегія фотоелектронної суперзмащуваності (PESL) (рис. 1), при якій надійна макромасштабна суперзмащуваність може бути досягнута в оточуючому вологому середовищі шляхом лазерного поромінення на місці контактної поверхні аморфної вуглецевої плівки. Показано, що PESL не тільки демонструє високу стійкість до збурення оточуючого середовища, але і відрізняється швидким відгуком. Утворення PESL відбувається з-за викликаного лазерним опроміненням утворення нанографен-шаруватого інтерфейсу і збагачення фотоелектронами на інтерфейсі, що приводить до відштовхуючого електричного поля між шарами нанографена. Відкриття PESL відкриває нові можливості для досягнення суперзмащуваності і дає нові ідеї для інтелектуального тертя і управління механічним рухом.

В статті [2] були синтезовані електропровідні тверді плівки з перехідним шаром Ti із застосуванням багатофункціональної технології магнетронного розпилення, і була створена струмопровідна фрикційна система для систематичного дослідження корозійної поведінки під час процесу тертя. По мірі підвищення струму коефіцієнт тертя демонстрував помітні різки коливання з-за виникнення електричної ерозії. Примітно, що були знайдені різні типові морфо-

логії дугової ерозії для виявлення поведінки електричної корозії і механізму ерозії (рис. 2), які можуть бути пов'язані з високою графітизацією у первозданих вуглецевих плівках, а також с газами, що утворюються при газифікації вуглецевих плівок і випаровуванні металу, що лежить під ними.

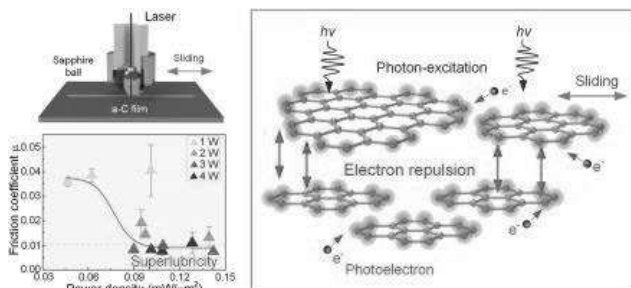


Рис. 1 – Схема стратегія фотоелектронної суперзмащуваності (PESL) [1]

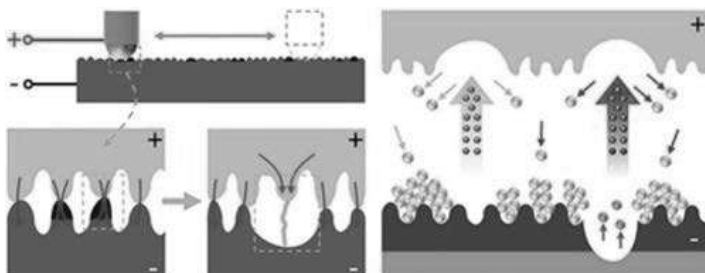


Рис. 2 – Схематичне уявлення струмопровідної фрикційної системи для дослідження корозійної поведінки під час процесу тертя [2]

Розуміння струмонесучого нанотертя дисульфиду молібдену (MoS_2) має вирішальне значення для розробки мікро/наноелектро-механічних систем на основі MoS_2 , а також для застосування MoS_2 у якості твердого змащення в присутності зовнішніх електричних полів. В статті [3] поведінка струмонесучого тертя в атомарно тонкому MoS_2 було досліджено за допомогою кондуктивної атомно-силової мікроскопії. Було встановлено, що сила тертя збільшується із підвищенням прикладеної напруги. Зокрема, тертя було нижчим при позитивних напругах зміщення у порівнянні з негативними напругами зміщення, причому різниця в терті ставала більш вираженою по мірі підвищення прикладеної напруги. Атомно-дозволені візуалізації тертя разом з картуванням поверхневого потенціалу показали, що накопичення поверхневого заряду на MoS_2 значно вплинуло на його фрикційну поведінку, де електростатична сила

створила більший енергетичний бар'єр для ковзання наконечника по MoS_2 при негативних напругах зміщення у порівнянні із позитивними напругами зміщення. Ці результати розширяють наші знання про тертя при проходженні струму через атомарно тонкий MoS_2 і мають важливе значення для розробки технологій з низьким тертям наступного покоління.

Сухі пари тертя в механічному обладнанні схильні до вібрації переривчастого ковзання, викликаной тертям (FISSV) в умовах низької швидкості ковзання і високого навантаження. Якщо взяти у якості прикладу фундаментальну тормозну систему високошвидкісних потягів, то при надзвичайно низьких робочих швидкостях (наприклад, при наближенні до станції) і при сильному терті між тормозним диском і тормозними колодками FISSV може виникати на тормозному інтерфейсі. Це, в свою чергу, може викликати вібрацію в тормозній системі, створюючи загрозу експлуатаційній безпеці. Високошвидкісні потяги працюють в регіонах із значними коливаннями вологості повітря. Але вплив вологості повітря на FISSV на тормозному інтерфейсі високошвидкісних потягів є недостатньо вивченим. В зв'язку з цим в статті [4] провели відповідні трибологічні випробування на основі декількох типових рівнів вологості, характерних для високошвидкісних залізниць Китаю. Результати засвідчили, що в умовах сухого повітря зміщення руху стержня FISSV пари тертя є більшим і триває довше. По мірі збільшення вологості повітря фаза стержня скорочується, і, як наслідок, частота FISSV піддається зростанню. Зокрема, коли вологість повітря складає RH 98%, FISSV демонструє характеристики малої амплітуди і високої частоти. Вологість оточуючого середовища в першу чергу змінює тертя і знос на інтерфейсі, тим самим впливає на характеристики FISSV. В сухому робочому середовищі на інтерфейсі тертя, ймовірно, утворюється стабільний шар тертя, збільшуючи жорсткість контакту інтерфейсу. В результаті пара тертя схильна відчувати FISSV з низькою частотою і високою інтенсивністю руху. У вологому середовищі наявність водяної плівки на інтерфейсі приводить до того, що зона контакту зношеної поверхні переважно складається з невеликих контактних площадок, що знижає жорсткість контакту інтерфейсу. В результаті пара тертя більш схильна до генерації FISSV з малою амплітудою і високою частотою. Тому за умов різної вологості повітря ефективний контроль характеристик тертя і зносу інтерфейсу може бути ефективним методом досягнення FISSV.

Тобто, основні сучасні напрацювання по спрямованому впливові на контактні поверхні при терті полягають у: спрямованому лазерному опроміненні, накладенню зовнішнього електричного потенціалу та врахуванні вологості оточуючого середовища.

Література

1. Chen C., Zhang Z., Lei F., Weng H., Xue P., Diao D. In-situ laser-irradiation induced robust macroscale superlubricity // Carbon. 2025. Vol. 242, July. P. 120424.
2. Lu M., Zhang J., Zhang P., Wang Q., Sang J., Hirahara H., Aisawa S., Chen D. Electrical corrosion behavior and erosion mechanism of conductive hard films during current-carrying friction // Diamond and Related Materials. 2025. Vol. 153, March. P. 112018.
3. Li B., Xu M., Zhang D., Zhang Y., Li Q., Dong M. Current-carrying friction of atomically thin molybdenum disulfide // Applied Surface Science. 2025. Vol. 685, 15 March. P. 162021.
4. Liu Z., Xiang Z., Xie S., Liu G., Tang B., Wang X., He D. The effect of environmental humidity on the friction-induced stick-slip vibration // Wear. 2025. Vol. 578–579, 15 September. P. 206208.

Лавріненко В.І., Смоквина В.В., Ільницька Г.Д. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Островерх Є.В. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СПРЯМОВАНОМУ СТВОРЕННІ ПОРИСТОСТІ У ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ І МОНОКРИСТАЛІЧНИХ АЛМАЗАХ ТА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Питанням досягнення спрямованої пористості в алмазах дослідники активно займаються після 2020 року і це нами свого часу (у 2023 році) було показано в публікації [1]. З тих пір пройшло 2 роки і нас, в даному випадку, зацікавили основні напрямки досліджень, якими опікуються сучасні дослідники, які є у наукових публікаціях за 2025 р., і саме на чому вони роблять наголос при досягненні пористості не тільки у алмазах, а і у алмазно-абразивному інструменті.

У дослідженні [2] повідомляється про економічно ефективну стратегію виготовлення легованого бором полікристалічного алмаза (В-PCD) без зв'язуючої речовини з пористою структурою поверхні. В процесі виготовлення застосовується нова технологія високої температури і високого тиску (НРНТ). За умов НРНТ кобальт (Co) слугує каталізатором, сприяючи росту зв'язків алмаз-алмаз між ча-

стинками легованого бором алмаза (BDD) промислового розміру. На відміну від традиційного метода хімічного осадження з газової фази (CVD-PCD), цей метод без застосування підкладки усуває проблему поділу алмаза і підкладки за рахунок зв'язування.

Пористі алмазні абразивні зерна, новий розроблений тип абразивного зерна для надточної обробки, показують значний потенціал для майбутніх застосувань завдяки своїй унікальній структурі пор. Однак механізми, що лежать в основі їх самозаточування, залишаються неясними. Крім того, лише небагато досліджень вивчали вплив геометрії пор і параметрів шліфування на ефективність самозаточування. Для усунення цієї прогалини в дослідженні [3] пропонується модель на основі метода дискретних елементів (DEM) для моделювання процесу абразивного зносу пористих алмазних зерен при різних умовах пор і шліфування. Модель фіксує динамічну еволюцію зносу і виявляє його вплив на поведінку самозаточування. Результати свідчать, що наявність пор допомагає знизити пошкодження, викликані шліфуванням. При фіксованому розмірі пор 5 мкм збільшення густини пор підвищує ефективність самозаточування. Однак непідходящі параметри шліфування, як недостатні, так і надлишкові, можуть перешкоджати самозаточуванню, приводячи до великих ушкоджень і виколочок. Для досягнення стабільного самозаточування слід підтримувати товщину недеформованої стружки на рівні 1 мкм і уникати тривалого високошвидкісного шліфування (швидкість круга більше 70 м/с).

Як показано на рис. 1, *a* при моделюванні пористі алмазні абразивні зерна спрощені до прямокутної заготовки розміром $50 \times 50 \times 40$ мкм. Поверхня блоку з нормаллю, вирівняної з позитивної віссю Z , визначена як модельована робоча поверхня. На цій поверхні побудована пориста структура для імітації пористості абразивного зерна, при цьому всі повітряні отвори встановлені на глибину 2 мкм. Радіус пористої частинки (R) складає 0,5 мкм, а радіус зв'язаного диска (RB) складає 0,6 мкм. Моделювання містить приблизно 105 000 частинок і 480 000 зв'язуючих зв'язків. Всі поверхні фіксовані, за виключенням верхньої частини абразивного зерна і верхнього кінця сторони, де відбувається контакт з оброблюваним матеріалом SiC, який виконує функцію різального інструменту з кутом нахилу різальної кромки (α), що дорівнював -30° і з радіусом затуплення вершини 1 мкм. У зв'язку із обмеженістю області моделювання рух абразивного зерна обмежено однонаправленим лінійним рухом. При моделюванні були застосовані наступні розумні

спрощення: (а) спрощення процесу стружкоутворення при шліфуванні; (б) виключення впливу форми і орієнтації абразивного зерна на дроблення; і (в) виключення термічних ефектів при руйнуванні абразивного зерна.

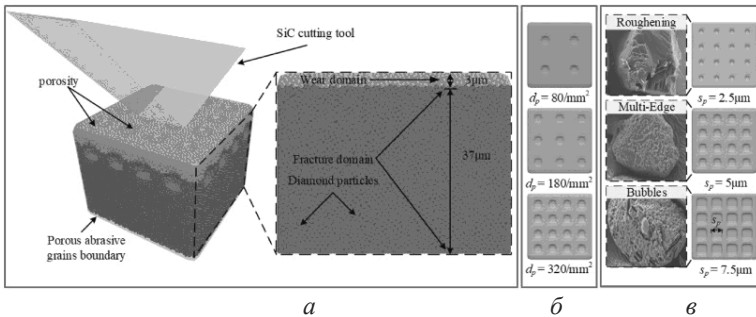


Рис. 1 – Самогострювальна ДЕ-модель пористих алмазних абразивних зерен (а); принципова схема групування d_p (б); принципова схема групування s_p (в) [3]

Нині шліфувальні характеристики пористих алмазних інструментів на металічній зв'язці в умовах рідинного охолодження широко вивчені, але їх характеристики і механізми зносу в умовах сухого охолодження залишаються недостатньо вивченими. В роботі [4] пористі алмазні інструменти Cu–Sn–Ti застосовувалися для шліфування кераміки YSZ в умовах сухого охолодження.

Номінальні властивості YSZ:

- густина 6020 (кг/м³);
- твердість 12 Гпа;
- модуль Юнга 200 Гпа;
- в'язкість руйнування 8 МПа·м^{0,5}
- теплопровідність 3 Вт/м·К

Досліджувався вплив параметрів шліфування (навантаження, швидкість і час шліфування, на морфологію поверхні інструмента, швидкість зйому матеріалу (MRR), коефіцієнт шліфування (G) і шорсткість поверхні YSZ (SR). Встановлено, що в процесі сухого шліфування із збільшенням навантаження шліфування ступінь стирання алмазних частинок в пористих інструментах Cu–Sn–Ti поступово підвищується. Із збільшенням навантаження шліфування інгибуюча дія пор на адгезію частинок YSZ до поверхні інструмента значно знижалася, а ступінь адгезії частинок YSZ спочатку під-

вищувалася, а надалі зменшувалася. Підвищення навантаження шліфування і швидкості шліфування відповідно збільшувало частку істотних руйнувань і відшарувань алмазних частинок. При навантаженні і швидкості шліфування 15 Н і 1000 об/хв відповідно частка відшарування алмазних частинок досягала найбільшого значення. В цей час частка мікротріщин, сильного руйнування і відшарування алмазних частинок складала 35:37:28. Найбільш критичними факторами, що впливають на швидкість зйому матеріалу, коефіцієнт шліфування і шорсткість поверхні YSZ пористих алмазних інструментів Cu–Sn–Ti, були швидкість шліфування, навантаження шліфування і час шліфування відповідно. Пористий алмазний інструмент Cu–Sn–Ti був придатний для застосування при низькому навантаженні (3 Н) і високій швидкості (1000 об/хв), досягаючи MRR, G і YSZ $26,44 \cdot 10^{-3}$ мм³/с, 42,30 і 3,34 мкм відповідно.

Пористі алмазні інструменти (алмазна крошка Cu–15Sn–7,5Ti+10 об.%) були виготовлені із застосуванням порошку Cu, розпиленого водою, порошку Sn, розпиленого газом, порошку TiH₂ (розмір частинок ≤ 45 мкм, чистота ≥ 99,5%) у якості сировини для алмазної крошки (70/80 меш, MBD-4, Henan Huanghe Whirlwind Co., Ltd.) [4]. Спочатку порошки Cu, Sn і TiH₂ були попередньо оброблені у кульовій дробарці для ефективної інкапсуляції TiH₂ у матриці Cu–Sn, мінімізує його руйнування в процесі окатування. Надалі попередньо оброблений порошок Cu–Sn–TiH₂ був рівномірно змішаний з 10 об.% алмазної крошки і 1 мас.% парафіну. Пористі алмазні інструменти Cu–Sn–Ti діаметром 40 мм були виготовлені із застосуванням двоетапного процесу спікання. 1-й етап спікання: низькотемпературне і короткочасове спікання під високим тиском. Попередньо оброблений порошок спочатку завантажували в циліндричну графітову форму (діаметр поперечного перерізу 40 мм), а надалі спікали під гарячим тиском в середовищі аргону для отримання гарячопресованих зразків з температурами спікання, гарячим тиском і часом витримки 350 °С, 30 МПа і 15 хв відповідно. 2-й етап спікання: високотемпературне тривале спікання при атмосферному тиску. Зразки, отримані на 1-му етапі, поміщали в атмосферну піч, а надалі витримували при температурі 800 °С протягом 30 хв в середовищі аргону. Пористий алмазний інструмент Cu–Sn–Ti (інструмент Т75) з додаванням 7,5 мас.% TiH₂, виготовлений даним методом має характеристики: пористість складає 22,5 об.%, серед-

ній діаметр пор – 2,3 мкм, міцність на згин – 269 МПа, а значення твёрдості за Вікерсом – 2,25 ГПа.

Перед випробуваннями на шліфувальну продуктивність інструмент Т75 заточувався протягом 30 хв наждачним папером SiC зернистістю 80. Після заточки висота алмазної різальної кромки інструмента Т75 складала приблизно 47 мкм. Шліфувальна продуктивність в сухих умовах була протестована за допомогою пристрою для тертя і зносу типу «штифт-диск» (HT-1000, Lanzhou Zhongke Kaihua Technology Development Co., Ltd) (рис. 2).

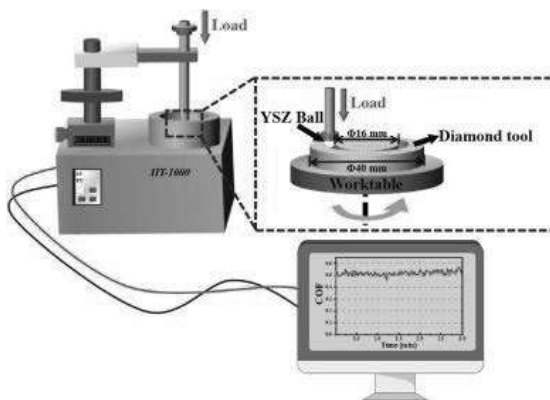


Рис. 2 – Принципова схема випробування на шліфування [4]

Матеріалом для шліфування були керамічні кульки YSZ. Інструмент Т75 був закріплений на шліфувальній платформі, а кулька YSZ була закріплена на контркульковому штифті. Шліфувальна канавка була розташована посередині поверхні пористого алмазного інструмента діаметром 40 мм. Шліфувальна платформа обертала інструмент Т75, викликаючи шліфувальну дію між ним і кулькою YSZ. Діапазони зміни швидкості шліфування, навантаження і тривалості шліфування склали 500–1000 об/хв, 3–15 Н і 9–30 хв відповідно [4].

Література

1. He K., Wu M., Shen W., Fang C., Yang X., Wang Y., Zhang Y., Chen L., Wang Q., Wan B., Zhang Z. Binder-free high-pressure, high-temperature surface-porous boron-doped polycrystalline diamond for electrochemical degradation of organic pollutants // *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 159, Part A, November. P. 112744.

2. Zhu Y., Wang L., Zhang Z., Xu J., Xiao M. Study on self-sharpening mechanism of porous diamond abrasive grain based on discrete element simulation // Journal of Materials Research and Technology. 2025. Vol. 38, September–October. P. 3643–3653.

3. Guo W., Cheng Y., Liu T., Wu L., Yan Z., Chen F. Effects of grinding parameters on the grinding performances of porous Cu–Sn–Ti diamond tools under dry condition // Journal of Materials Research and Technology. 2025. Vol. 38, September–October. P. 3891–3899.

Логінова Ю.В. Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ НК ТА ТД ДЛЯ ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

При зварюванні в конструкціях виникають зварювальні деформації та напруги, які в більшості випадків істотно впливають на їх експлуатаційно-технологічні показники.

На основі глибокого та всебічного аналізу складних деформаційно-силових процесів, що протікають при зварюванні в конструкції, була розроблена система заходів, що забезпечує зниження негативного впливу зварювальних напружень та деформацій.

У процесі зварювання та подальшого охолодження у зварному з'єднанні протікають складні термодформаційні процеси, що зумовлюють утворення тимчасових напруг, які після охолодження переходять у залишкові.

Одним із найважливіших процесів є аналіз причин утворення залишкових напруг у зварному з'єднанні (конструкції).

Для забезпечення впевненості в тому, що зварна конструкція відповідає вимогам на всіх стадіях виробництва та експлуатації, для визначення невідповідностей виробів на ранніх стадіях, а також для розробки коригувальних впливів та постійного покращення процесів зварювання використовується процедура моніторингу.

При моніторингу у зварювальному виробництві застосовується така послідовність дій:

1. Розробити для кожної з наступної стадії окремий план чи процедуру:

- вхідного контролю та випробувань (з урахуванням рівня контролю, який виконує Постачальник);
- технологічного контролю та випробувань у процесі виробництва;
- остаточний контроль та випробування.

2. Розробити політику якості.

3. Визначити категорію зварних конструкцій.

4. Визначити перелік неприпустимих дефектів з метою оцінки якості.

5. Розробити процедури аналізу та виконання спеціальних вимог НД.

6. Забезпечити наявність у технологічному процесі виробництва зварної конструкції актуалізованих процедур випробувань.

7. Забезпечити ідентифікацію виробів, призначених для відправки Споживачу та складання протоколів контролю та випробувань.

8. Забезпечити випуск продукції Споживачу після завершення випробувань та реєстрації результатів у протоколах.

9. Проаналізувати моніторинг та, при необхідності, переглянути/поліпшити процедури НК та ТД.

10. Виконати оцінку перегляду процедур НК та ТД за результатами випробувань.

Необхідна документація щодо якості зварних конструкцій виконуються у вигляді процедур випробувань та критеріїв:

- вхідного контролю та випробувань;
- контроль та випробування в процесі виробництва;
- контроль та випробування готових конструкцій.

Необхідні записи якості для технічного експерта виконують у вигляді протоколів з результатами випробувань і контролю:

- вхідного;
- у процесі виробництва (технологічного);
- готової зварної конструкції.

Для проведення моніторингу вимірювань на стадіях ремонту, виготовлення зварної конструкції при неруйнівному контролі (НК) та технічній діагностиці (ТД) для сертифікації зварних конструкцій необхідно використовувати стандарт ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Вимогам стандарту мають відповідати випробувальні лабораторії. Вони забезпечать також функціонування експертних систем при неруйнівному контролі (НК) та технічній діагностиці (ТД) зварних конструкцій.

Система, що поєднує знання, досвід технічного експерта та можливості аналізу (за допомогою персонального комп'ютера) у

формі, що пропонує рекомендації чи вирішення проблем безпеки для оцінки стану об'єктів називають експертною системою.

Основними методами роботи технічного експерта, який працює за допомогою експертної системи (оцінка об'єктів, що вичерпали індивідуальний ресурс), є:

- спостереження за станом зварної конструкції;
- опитування персоналу в організації;
- збирання об'єктивних доказів – випробування;
- аналіз результатів випробувань (складання «експертного висновку»).

Головною вимогою до експертного доказу, отриманого після моніторингу, є його достовірність і достатність. Доказ вважається достовірним, якщо він гідний довіри експерта і є правдоподібним. Достатність доказу визначається його переконливістю, що залежить від компетентності експерта та випробувальної лабораторії.

Насправді виконання вимоги постійного поліпшення при моніторингу зварної конструкції найчастіше викликає труднощі у випробувальній лабораторії НК і ТД. У цій ситуації доцільно використати концепцію та методологію, яка виключає можливості негативних наслідків від недостовірних результатів вимірювань. Можливість відхилення від достовірного результату чи події зумовлена ризиком, що описаний у стандартах.

Поєднання ймовірності події та її наслідків є ризиком.

Менеджмент ризику – скоординовані дії з керівництва та управління у випробувальній лабораторії щодо ризику.

Аналіз ризику – систематичне використання інформації при моніторингу визначення джерел і кількісної оцінки ризику.

Оптимізація ризику – процес, пов'язаний з ризиком, спрямований на мінімізацію негативних та максимальне використання позитивних наслідків та відповідно до їх ймовірності.

Циклічний процес аналізу ризику повинен включати шість наступних етапів:

1. Визначення сфери застосування.
2. Ідентифікація небезпеки та попередня оцінка наслідків.
3. Оцінка величин ризику кожної небезпеки.
4. Перевірка результатів аналізу (випробування об'єкта).
5. Документування одержаних результатів (протоколів) та їх обґрунтування.
6. Коригування результатів аналізу з урахуванням останніх даних вимірювань, отриманих під час моніторингу об'єкта.

Під час проведення аналізу ризику експерт виконує такі дії:

- визначає в об'єкті можливі види дефектів, вивчає причини виникнення, механізми та умови виникнення, розвитку;
- визначає можливі наслідки виникнення дефектів, проводить якісний аналіз тяжкості наслідків дефектів та (або) кількісну оцінку їх критичності;
- складає та періодично коригує переліки критичних елементів зварної конструкції та застосовуваних технологічних процесів;
- виробляє пропозиції та рекомендації щодо внесення змін у конструкцію та (або) технологію експлуатації об'єкта та його складових частин, спрямовані на зниження ймовірності та (або) тяжкості наслідків дефектів, оцінює ефективність раніше проведених ремонтних робіт;
- оцінює достатність передбачених контрольно-діагностичних та профілактичних операцій, спрямованих на запобігання дефектам у зварній конструкції;
- аналізує правила поведінки персоналу в аварійних ситуаціях, зумовлених можливими дефектами, передбаченими експлуатаційною документацією. При цьому виробляє пропозиції щодо їх удосконалення або внесення відповідних змін до експлуатаційної документації за відсутності правил поведінки;
- проводить аналіз можливих помилок персоналу в системі, оцінює їх можливі наслідки, виробляє пропозиції вдосконалення системи та запровадження додаткових засобів захисту об'єкта від помилок персоналу, а також щодо вдосконалення документованих процедур.

Проблему оцінки зварних конструкцій після тривалої експлуатації вирішується під час моніторингу за допомогою експертної системи. Програма, що містить алгоритм, забезпечує оцінку стану об'єкта на основі вимог НД. У системі загального призначення алгоритм досягнення цілей розроблений для того, щоб система була самонавчальною. Вона виробляє процедури шляхом аналізу результатів випробувань, одержаних у лабораторіях НК та ТД на об'єкті для вдосконалення оцінки відповідності (стану) зварних конструкцій послідовною чи паралельною процедурами.

Lopata O.V., Pisarenko G.S. Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv
Katerinich S.Y. Central Ukrainian National
Technical University, Kropyvnytskyi
Rybak I.P. National Transport University, Kyiv

DEPENDENCE OF THE ELASTIC MODULUS OF POWDER COATINGS ON THEIR POROSITY IN ELECTRICAL CONTACT HARDENING

Porosity is an inherent feature for many types of powder coatings and is considered to be of their second (after adhesion strength), but in some cases, of the first order property. It is the main means of assessing the quality of coatings, especially corrosion-resistant and wear-resistant coatings, where its presence is undesirable. A significant decrease in the porosity of coatings can be achieved by thermal hardening. However, it should be noted that in some cases the volumetric heat treatment of coatings is undesirable, since it deteriorates their physical and mechanical properties [1]. Required compaction of coatings can be achieved using chromium and aluminum-containing phosphate binders as well as polymeric and other materials [1]. For the same purposes, chemical heat treatment (CHT) is used. In order to increase the coating density, methods of subsequent processing of coatings have become widespread such as overflow in a furnace or with an open flame of a gas burner, as well as impregnation with plastics or molten metals.

The current methods of coating processing have a number of disadvantages: as a rule, during the overflow the pores are closed only at the outer surface of the coating while in the subsurface layers they preserve. An increase in the density of the sprayed coatings is facilitated by an increase in the intensity of the mechanical-thermal interaction between particles of the powder and the base during both formation of coatings and subsequent mechanical-thermal treatment. The use of mechanical-thermal treatment of as-formed coatings (for example, deposited by gas thermal spraying) makes it possible to increase the coating density in parallel with maximal preservation of the original structure and properties of the powder [1]. A significant decrease in porosity after MTF in comparison with the effect of gas-flame treatment is due to the positive role of the mechanical factor, which under high temperatures determines the development of plastic deformations that contribute to the "healing"

of pores [1]. The interaction of materials in the solid phase is activated not only by temperature, but also by pressure [1].

According to the reviewed literature and patent information, among the large number of current mechanic-thermal methods of hardening parts with powder and compact materials, the advantage should be given to electric contact ones [1], because they allow one: to obtain practically non-porous coatings; more than 150 MPa; to preserve the original properties of the coating materials, to improve the properties of the base material, to achieve the minimum zone of thermal influence of current on the part (0.1–0.3 mm) thanks to the short duration of heating pulses, and to increase the thickness of coatings by 3–6 times. Moreover, they are characterized by high productivity along with low energy consumption and do not require any protective atmosphere, light radiation or gas release. The first was determined by calculation using the Kashin procedure [2–4].

$$E = E_0(1 - \alpha_E P),$$

where E is the elastic modulus; E_0 is the elastic modulus of non-porous material; α_E is a constant obtained by calculation for spherical closed porosity; P is the porosity.

The decrease in the elastic modulus for a coating obtained by electric arc spraying may be due to the presence of 20% pores and its layered structure (Table 1). Coating material: powder of hard alloy PG-12N-01 (base Ni, 8–14% Cr, 1.7–2.5 V; 1.2–3.2 Si; 1.2–3.2 Fe; 0.3–0.6 C); flux-cored wire PP FMI-2; charge FKkB (50% Cr; 20% B, 7% Al, 3% Ti, 20% Fe) + Al.

Table 1 –Dependence of mechanical properties of coatings on porosity

Method	Material	Elastic modulus $E \cdot 10^{-3}$, MPa						
		base Steel 45	porosity of coating, %					
			5	10	15	20	25	30
Gas flame spraying	PG-12N-01	2	–	–	3.2	2.7	2.5	2.2
Electric arc spraying	PP FMI-2		–	–	0.8	0.75	0.70	0.60
Electric contact	PP FMI-2		1.35	–	–	–	–	–

Conditions of the electric contact method for forming coatings: voltage 3–6 V; current 8–12 kA; load on the electrode 10–30 MPa; current pulse time 0.02–0.04 s; pause time 0.02–0.04 s. Conditions of the electric arc spraying: voltage 18–35 V; current 50–600 A; the nozzle-surface distance 50–200 mm; compressed air pressure 0.4–0.5 MPa; compressed gas (air) consumption 60–150 m³/h. The decrease in the elastic modulus of

coatings is due to the presence of porosity (up to 30% after gas flame spraying and up to 20% after electric arc spraying). The electric contact method of forming coatings (electric contact method of processing coatings) makes it possible to reduce the porosity to 5–6% and to bring the value of the elastic modulus closer to that of compact materials.

References

1. Лопата Л. Electric contact hardening as a method of engineering the surface of parts of transport equipment when prepared and restored // Collection of Science Practices of Transport University and Transport Academy of Ukraine. – Вип. 4. – Київ : РВВ НТУ, 2000. – С. 3–6.
2. Race, R. W. Effects of inhomogeneous porosity on elastic properties of ceramic properties of ceramics // J. Amer. Ceram. Soc. Discussion and Notes. – 1975. – Vol. 58, No. 9–10. – P. 458–459.
3. Kharlamov, Yu. A. Prediction of the porosity of powder coatings // Powder Metallurgy. – 1990. – No. 12. – P. 36–41.

Лопата Л.А., Рутковський А.В., Буйських К.П.
Інститут Проблем міцності імені Г.С. Писаренка
НАН України, Київ

СПОСОБИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Титанові сплави, які в порівнянні зі сталями є корозійностійкими та мають більшу питому міцність, широко використовуються в якості основного конструкційного матеріалу в авіаційній промисловості [1, 2]. Але, у зв'язку із підвищенням температури різко знижуються механічні властивості титанових сплавів завдяки проходженню дифузійних процесів, що обмежує їх застосування та сприяє використанню сталевих матеріалів і нікелевих сплавів. Постає протиріччя в неможливості титанового сплаву забезпечити необхідний рівень властивостей в умовах одночасної дії навантаження та температури [1].

Успішне використання титанових сплавів стає можливим лише при використанні технологій поверхневого зміцнення [2, 3]. Методи поверхневого зміцнення титанових сплавів реалізуються шляхом модифікації поверхні та нанесення багатофункціональних покрит-

тів [2–5]. Методи поверхневого зміцнення титанових сплавів шляхом модифікації поверхні систематизують і класифікують за наступною схемою:

- механічні методи (методи, що базуються на пластичній деформації, наприклад, ультразвукове зміцнення, зміцнення енергією вибуху, вигладжування, обкатка роликками та ін.);
- методи фізико-хімічного модифікування матеріалу поверхневого шару (наприклад, лазерна обробка, іонна імплантація, хіміко-термічна обробка, іонне азотування та ін.).

Успішне використання титанових сплавів можливо не лише при використанні методів поверхневого зміцнення шляхом модифікації поверхні, а також при використанні методів нанесення зміцнюючих захисних покриттів [4].

В даний час відомо понад 130 методів нанесення функціональних покриттів (захисних, корозійностійких, антифрикційних та ін.), що відрізняються фізичними, механічними, хімічними й багатоопераційними способами утворення [4]. Більшість методів нанесення функціональних покриттів альтернативні. Основна мета кожного методу - сформувати на поверхні деталі зносостійкий шар, який повинен мати міцний зв'язок із зміцнюємою поверхнею. Один і той же матеріал покриття можна нанести самими різними способами. При цьому властивості покриттів і витрати на їх формування можуть суттєво відрізнятися [4].

У зв'язку з цим виникає необхідність систематизації й класифікації наявних методів нанесення покриттів за наступною схемою:

- методи нанесення покриттів (наприклад, детонаційне напылення, осадження з парової фази, гальванічні покриття та ін.);
- плакування у двох та багат шарових комбінаціях метал-метал, що одержуються різними способами;
- комбіновані методи.

На вибір методу осадження покриттів впливають наступні фактори: властивості матеріалу, який пропонується нанести; обмеження, що вносяться зміцнюємою поверхнею (наприклад, максимально допустима температура нагрівання зміцнюємої деталі); величина адгезійної міцності покриття зі зміцнюємою поверхнею; необхідне обладнання та спеціальні засоби технічного забезпечення; вартість, дефіцитність матеріалів; екологічні аспекти.

Вибір захисних покриттів проводиться за основними показниками [4]: за корозійною та ерозійною стійкістю, припрацьовуваніс-

тю, величиною зносу. Але для правильного вибору складу та способу формування покриття цих критеріїв недостатньо. Необхідно враховувати ще конструктивно-технологічні вимоги, що пов'язані із процесом експлуатації деталей та склад покриття. Тому, вимогами щодо захисних покриттів є [4, 5]:

- недопустимо в склад покриття включати елементи, в яких невелика вільна енергія Гіббса утворення оксидів та низька температура плавлення, таких як CdO, ZnO, SnO, PbO, V₂O₅ та MoO₃;
- товщина покриття не повинна перевищувати 40–100 мкм;
- захисне покриття та спосіб його нанесення не повинні підвищувати шорсткість поверхні;
- температура формування покриття не повинна бути нижче температури фінішної термічної обробки матеріалу, що використовується для виготовлення деталі. Для деталей, виготовлених із титану при нанесенні захисних покриттів необхідно технологічний процес проводити в середовищі інертних газів або у вакуумі;
- в поверхневих шарах покриття повинно бути створено стискуючі напруження. Напруження стиску сприятливо впливають на межу втоми деталей;
- покриття повинне мати хорошу адгезійну міцність з матеріалом зміцнюємої поверхні.

Одним із напрямків щодо підвищення ресурсу зміцнюємих і відновлюємих деталей є необхідність впровадження в технологію їх виготовлення, модернізації, відновлення та ремонту перспективних технологічних процесів нанесення покриттів. Використання нових і удосконалених методів відновлення та зміцнення робочих поверхонь конструктивних елементів шляхом нанесення покриттів дозволяє скоротити використання запасних частин, збільшити їх ресурс при збільшенні термінів їх експлуатації [4].

Задача вибору конкретного методу формування поверхневого шару являє собою складну техніко-економічну задачу. Головне завдання при застосуванні методів нанесення функціональних покриттів – це використання енергозберігаючих технологій з аналізом їх економічних і екологічних показників. При цьому необхідно орієнтуватися на вітчизняні розробки, які відповідають світовому рівню методів нанесення зміцнюючих захисних покриттів (ЗЗП). У цьому зв'язку необхідно максимально прагнути [1–5]: до підвищення наукоємності технологічного забезпечення методів поверхневого зміцнення; до зменшення витрат ресурсів на технологічне

забезпечення процесів нанесення зміцнюючих захисних покриттів (ЗЗП); до забезпечення зростання прибутку при збільшенні розмірів інвестицій в даний напрямок.

Сьогодні при виборі технології нанесення покриттів вирішальними стають економічні показники та енергоємність.

Вакуум-плазмова технологія відноситься до високоенерго- та матеріалозберігаючих технологій, а також до екологічно чистих. Тому вакуум-плазмові методи займають значне місце в зміцнювальній обробці титанових сплавів [5]. Собівартість вакуум-плазмових покриттів в 5–10 разів нижче за аналогічні електронно-променеві [4]. Несуча здатність вакуум-плазмових покриттів досягає контактних навантажень до 300 МПа [5].

У літературі досить багато досліджень присвячених нанесенню вакуум-плазмових покриттів [1–5]. Слід зазначити істотний внесок у розвиток вакуум-плазмових технологій та обладнання для серійного виробництва Харківської школи – батьківщини всесвітньо відомої технології PVD.

В працях Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України показано, що технологія нанесення вакуум-плазмових покриттів підвищує весь комплекс термомеханічних властивостей композиції «зміцнюєма поверхонь деталі – покриття» [4, 5]. Так межа багатоциклової високочастотної витривалості підвищується на 20%, ерозійна стійкість в потоці пилу – в 10–12 разів, межа плинності та межа міцності підвищується на 4% без зниження пластичності. Швидкість ізотермічної та термоциклічної повзучості зменшується в 4 рази. За рахунок теплозахисного ефекту вакуум-плазмового покриття та його корозійної стійкості показана можливість експлуатації титанових сплавів в окислювальному середовищі до температур 590 °С. У всіх видах випробувань адгезійного відшарування покриття не мало місця [3–5].

Література

1. Frazier W. E., Polakovics D., Koegel W. Classification of metallic materials and structures for aerospace applications. JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2001, 53(3), p. 16–18.
2. Кудрин А. П., Лабунець В. Ф. Перспективні напрямки в області поверхневого упрочнення і відновлення деталей авіаційної техніки. Технологічні системи, 2002, № 5, с. 14–18.

3. Ляшенко Б. А., Рутковський А. В., Мирненко В. І. Поверхневе упрочнення титанових сплавів для перспективних розробок. Артилерійське і стрілецьке озброєння, 2004, № 2, с. 50–53.

4. Покриття та їх використання в техніці // «Прочність матеріалів і конструкцій», за ред. В. Т. Троценка – 2-ге вид. Київ, Академперіодика, 2006, с. 981–1074.

5. Мирненко В. І., Зенкін М. А., Рутковський А. В. Підвищення термомеханічних властивостей сплавів титану формуванням захисних покриттів. Вісник Технологічного університету Поділля, Хмельницький, ТУП, 2004, ч. 1, т. 3, № 2, с. 142–146.

Lopata V.M. National Transport University, Kyiv
Solovykh A.Y. Central Ukrainian National
Technical University Kropyvnytskyi
Kachynska I.R., Pisarenko, G.S. Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY ELECTRIC ARC SPRAYING

In the practice of restoring and hardening parts through the use of hardening protective coatings, extensive experience has been accumulated in the application of coatings by methods of gas-thermal spraying (GTS) [1, 2]. The produced domestic and foreign GTS units [1, 2], spray materials [3], and published recommendations have made it possible to solve a series of items related to the repair, restoration, and prolongation of the service life of parts [1, 2]. In the world practice of hardening, recovery, and anticorrosion protection, EAS has become widespread as the most technologically advanced and productive method (productivity is 3-4 times that for flame spraying) [1, 2].

The aim of the work – was set up to increase the wear resistance and service life of parts *via* combining EAS coatings characterized by high density, adhesion strength, and microhardness due to the activation of the spray process and nitriding of the coatings sprayed. Studies of the effect of the average particle size of spray wires from 40Kh13, 12Kh18N10T, nichrome and powder wire FMI-2 on the physico-mechanical properties of coatings revealed that coatings made from steel

wires show a decrease in adhesion with increasing porosity, whereas nichrome does not obey this rule.

As seen in the figure, the curve of accumulated weight wear of tempered steel has a characteristic stage of running-in and a steady wear stage with almost linear dependence of the weight wear on the friction path. For EAS coatings, the stages of steady wear periodically alternate with the relatively short-term stages of accelerated wear, i.e., wear of EAS coatings is pronouncedly cyclical.

The highest averaged weight wear rate was 0.39 mg/m (Table 1).

Table 1 – Wear rate and coefficient of dry friction for EAS coatings and tempered powder wire FMI-2

Material	Wear rate, mg/m	Coefficient of friction
Powder wire FMI-2	0.12	0.82 – 0.93
EAS coating	0.27	0.83 – 0.96
EAS coating	0.39	–1.02

A number of researchers have noted that the structure of coatings obtained by spraying the same wire material by different modes can differ not only in the number of pores, but also in the phase composition [1, 3]. This paper presents the results of studies of the structural features of EAS coatings. As spray materials, FMI-2 powder wires with a diameter of 2 mm were used. Spraying was performed using an apparatus for EAS in the following modes:

- mode 1: spraying of metal melted in an electric arc with a reactive jet of combustion products of propane/air mixture with an excess of propane (reducing atmosphere);
- mode 2: spraying of metal melted in an electric arc with a reactive jet of combustion products of the propane/air mixture with an excess of air (oxidizing atmosphere);
- mode 3: spraying of metal melted in an electric arc with a fast air jet.

The present work recommends to increase the wear resistance, corrosion resistance, and service life of parts *via* hardening and renovating them using combined EAS coatings characterized by high density, adhesion strength, and microhardness due to activation of the spraying process.

It has been shown that by properly choosing design parameters and characteristics of equipment for EAS, it is possible to control the properties of restored surfaces in order to increase the service life of SMM parts. The right choice of equipment for spraying will allow one to in-

crease the speed and temperature of the jet of spraying gas and molten particles, decrease the droplet diameter, increase the density, and reduce the oxidation of coatings.

Moreover, the phase composition and microhardness of coatings obtained by spraying wires from austenitic and martensitic steel were investigated. The presence of an abnormally large amount of residual austenite (to 50 vol %) in coatings from martensitic steel was established.

Studies of the resistance to fatigue failure showed that coatings deposited by EAS of wires provide a slight decrease in the fatigue strength limit to 10–13% (for comparison, coatings obtained by vibro-arc surfacing reduce the fatigue limit by 35–40%).

In the course of tribological tests, the wear of sprayed coatings was established to be cyclical. The cyclicity of weight wear of sprayed coatings is associated with the degradation of their surface layer under friction, described in terms of physical mesomechanics of solids.

References

1. Ageev M. S., Volkov Yu. V., Chigrai S. L. Protective and hardening coatings in shipbuilding and repair. Science Bulletin KhDMA, Херсон, № 2 (13), 2015, с. 110–124.

2. Ageev M. S., Volkov Yu. V., Chigrai S. L. Welding and related processes in shipbuilding. Water Transport, Київ: КГАВТ, № 2 (24), 2015, с. 15–26.

Майданчук Т.Б., Лук'янченко Є.П., Степченко Д.М.
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, Київ,
Лаптева Г.М. Національний університет
«Запорізька політехніка», Запоріжжя

ОТРИМАННЯ АНТИФРИКЦІЙНОГО ШАРУ НИЗЬКОЛОВЯНОЇ БРОНЗИ НА СТАЛІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ MIG-ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ

Зварювання різнорідних металів є одним із складних завдань сучасного машинобудування та суднобудування. Особливий інтерес становлять біметалеві з'єднання на основі мідних сплавів і конструкційних сталей. При цьому сталь забезпечує отримання високої міцності виробу, а бронза дозволяє отримати високі

антифрикційні властивості в таких виробках як втулки кочення та деталях запірної арматури [1]. Слід зазначити, що система бронза – низьколегована сталь характеризується значною різницею фізико-хімічних властивостей: температур плавлення, теплопровідності, коефіцієнтів теплового розширення [2]. Відомо, що для наплавлення бронз на сталь можуть застосовуватись різні способи зварювання [3]. Однак, найбільш широко застосовуваним способом є MIG-процес зварювання. При цьому в останні роки знаходить широке застосування імпульсно-дугове зварювання. Цей процес знаходить все більш широке використання при виготовленні зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів, титану та конструкційних сталей міцністю до 500 МПа [4]. Пояснюється це тим, що при імпульсно-дуговому зварюванні розширюються можливості управління процесами плавлення і переносу електродного металу в різних просторових положеннях, поліпшується формування швів, зменшуються об'єми перемішування електродного металу з основним металом та розміри зони термічного впливу [5]. Саме з цим пов'язано те, що такі відомі фірми, як Fronius (Австрія), ESAB (Швеція), EWM (Німеччина) та інші, значну увагу в своїй діяльності приділяють розробці та виготовленню обладнання для реалізації і розширення можливостей імпульсно-дугового процесу зварювання в захисних газах, в тому числі для зварювання бронз різного хімічного складу.

В зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу існуючих імпульсно-дугових способів наплавлення бронзи на сталь з можливістю мінімізації проплавлення сталі та забезпечення високих показників продуктивності процесу. Для вирішення поставленого в роботі завдання проводили наплавлення зварювальним дротом Bergoweld K-5 (вміст олова 0,75–0,9% Sn) діаметром 1,2 мм із застосуванням джерела живлення EWM Titan XQ AC Pulse 400, в синергетичному управлінні якого присутні такі програми «standart»; «pulse»; «cold arc»; «cold arc pulse», «brazing» на сталь 20 товщиною 14 мм. Попередньо було визначено орієнтовні параметри режиму наплавлення на сталь (швидкість наплавлення, струм, напруга) із застосуванням програми «standart», який дозволив отримати мінімальне перемішування наплавленої бронзи зі сталлю, хороше формування валику та отримати високі показники продуктивності (не менше 3,0 кг/год).

В подальших експериментах застосовували дані режими для всіх досліджуваних програм. Результатами експериментів встановлено,

що найбільша продуктивність забезпечується при застосуванні програми «pulse» (при однакових показниках струму та швидкості наплавлення). При цьому відмічено, що наплавлений валик має рівномірну висоту та відсутні підвороти, які можуть призводити до утворення дефектів при наплавленні наступних валиків з перекриттям. Слід відмітити що на одному і тому ж режимі зварювання, але з різними програмами («coldarc» та «coldarc pulse»), і на різних швидкостях наплавлення продуктивність процесу залишається незмінною, але глибина ЗТВ і її площа менші при використанні більших швидкостей в середньому на 25 та 50% відповідно, що пов'язано із меншим тепловкладенням в основний метал. При цьому доля основного металу збільшується з 1,7 до 6,1%, що впливає на вміст заліза в наплавленому металі. Встановлено, що при застосуванні програми ««pulse»» доля основного металу (сталі) не перевищує 2,8%.

При металографічних дослідженнях з'єднань, отриманих за досліджуваною технологією встановлено, що структура наплавленого металу дисперсна, виражених дендритів та включень сталі розміром більше 1,0 мм не спостерігається. Твердість наплавленого металу становить 80–90 HV. Антифрикційні властивості наплавленого шару бронзи становить 3,8 мг/км, а контртіла 10,9 мг/км при застосуванні в якості контртіла сталі ШХ15 твердістю 59–62 HRC.

В результаті проведених експериментів можна стверджувати, що наплавлення низькоалюв'яної бронзи на сталь пульсуючою дугою дозволяє розширити можливості керування формоутворенням шва, збільшити ширину шва і зменшити ширину ЗТВ в порівнянні зі зварюванням стаціонарно дугою при високій продуктивності процесу наплавлення та мінімізації проплавлення сталі. При цьому забезпечуються високі показники антифрикційних властивостей наплавленого шару бронзи.

Література

1. Пахаренко В. Л., Марчук М. М. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво): навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2009. 179 с.
2. Callister W. D. Jr. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2018.
3. Илюшенко В. М., Лукьянченко Е. П. Сварка и наплавка меди и медных сплавов. К.: М. А. «Сварка», 2013. 396 с.
4. Zavdoveev A., Rogante M., Poznyakov V., et al. Development of the PC-GMAW welding technology for TMCP steel in accordance with

welding thermal cycle, welding technique, structure and properties of welded joints // Reports in Mechanical Engineering. 2020. № 1. P. 26–33.

5. Жерносеков А. М. Тенденції розвитку управління переносу металу в захисних газах (огляд) // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 33–38.

Манохін А.С., Клименко С.А. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОСТІЙКИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА РІЗНИЦЮ ТЕМПЕРАТУР НА ЇХ ПОВЕРХНЯХ

Теплопровідні властивості термостійких захисних покриттів для навантажених деталей техніки та інструментів мають значний вплив на їх експлуатаційні властивості – теплопровідність покриття впливає на зміну теплового балансу в зоні навантаження [1, 2]. Покриття створює тепловий бар'єр, ізолюючи основний матеріал деталі від впливу тепла, що утворюється в процесі експлуатації. При цьому відбувається перерозподіл теплових потоків між контактуючими деталями.

Чисельне моделювання дозволяє оцінити ступінь впливу товщини покриття і його теплопровідності на різницю температур в точках, розташованих на вільній поверхні покриття і на границі його контакту з підкладкою. В якості термостійких приймаємо покриття, для яких, залежно від співвідношення хімічних складових, а також умов нанесення, величина теплопровідності становить 0,5–10,0 Вт/мК, а товщина – 0,5–8,0 мкм.

В процесі моделювання вирішувалося двовимірною лінійною нестационарною задачею теплопровідності. На вільну поверхню покриття діють теплові потоки від тертя у контактній зоні, а на щільність тепловідводу на нижньої границі покриття складає $q = (0,5–4,0) \cdot 10^6$ Вт/м².

На рис. 1 наведено результати, отримані під час моделювання.

Товщина покриття та щільність тепловідводу на нижньої границі покриття для покриттів з високої теплопровідністю лінійно впливають на різницю температур в точках, розташованих на вільній поверхні і на границі контакту покриття з підкладкою. При цьому такий

вплив достатньо слабо зростає зі збільшенням товщини покриттів, що характеризуються величиною теплопровідності 7–10 Вт/мК. Для покриттів, що характеризуються низькими значеннями щільності тепловідводу на нижньої границі вплив теплопровідності на різницю температур в точках, розташованих на вільній поверхні і на границі контакту покриття з підкладкою, практично відсутній.

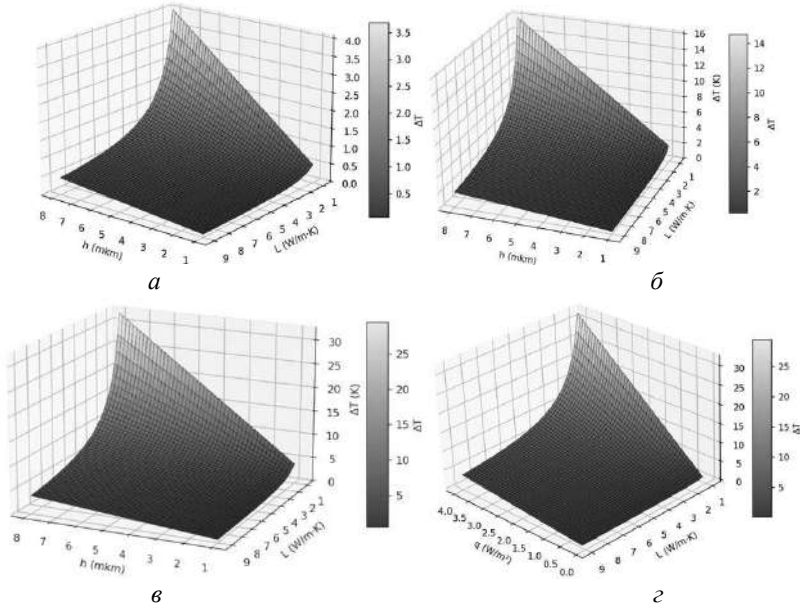


Рис. 1 - Вплив умов теплового навантаження на різницю температур в точках, розташованих на вільній поверхні і на границі контакту покриття з підкладкою:

а–в – товщини і теплопровідності покриття (щільності тепловідводу на нижньої границі і теплопровідності покриття: *а* – $0,5 \cdot 10^6$ Вт/м²; *б* – $2 \cdot 10^6$ Вт/м²; *в* – $4 \cdot 10^6$ Вт/м²) *г* – щільності тепловідводу на нижньої границі і теплопровідності покриття (товщина покриття 8 мкм)

Для покриттів з низькою теплопровідність (1–5 Вт/мК) вплив товщини покриття та щільності тепловідводу на нижньої границі покриття на різницю температур в точках, розташованих на вільній поверхні і на границі контакту покриття з підкладкою, багатократно зростає. Для покриттів значної товщини та покриттів, для яких має місто висока щільність тепловідводу на нижньої границі, можна відмітити яскраво виражене збільшення різниці температур в точках, розташованих на вільній поверхні і на границі контакту покриття з

підкладкою, зі зростанням теплопровідності покриття, а зміна такого впливу має складний нелінійний характер.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для максимального зниження температури на границі контакту з підкладкою потрібно використовувати покриття з найбільшою можливою товщиною та мінімальною теплопровідністю. Це дозволяє рекомендувати хімічний склад покриття, метод та режими його формування.

Література

1. Різальні інструменти з композитів на основі кубічного нітриду бору з покриттям / А.С. Манохін, С.А. Клименко, В.М. Береснєв, С.Ан. Клименко, М.Ю. Копейкіна, В.О. Столбовий, С.В. Литовченко. – К. : Наук. думка, 2022. – 176 с.

2. Іонно-плазмові багаточарові та багатокомпонентні покриття / М.О. Азаренков, В.М. Береснєв, С.В. Литовченко, О.Д. Погребняк, О.В. Максакова, С.А. Клименко, В.О. Столбовой, А.С. Манохін, О.В. Соболев. – К. : Академперіодика, 2025. – 174 с.

*Мельнійчук Ю.О., Чумак А.С., Клименко С.А.,
Манохін А.С., Клименко С.Ан., Мельнійчук Б.Ю.*
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ РСВН ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ТОЧІННІ ВИСОКОМІЩНОГО ЧАВУНУ ВЧ40

Проведено комплекс експериментальних досліджень процесу лезової обробки високоміщного чавуну ВЧ40 твердістю 330 НВ інструментами із РСВН групи ВН (система сVN (97%) – Al (3%)). Дослідження виконувались при параметрах різання: $S = 0,1$ мм/об.; $t = 0,5$ мм, у широкому діапазоні швидкостей різання. Встановлено, що характер та інтенсивність зношування інструменту суттєво залежать від швидкості різання.

Показано, що при швидкостях різання до 120 м/хв домінуючим є зношування інструменту по задній поверхні з формуванням фаски зносу, що характерно для абразивно-механічного механізму руйнування різальної кромки. У цьому діапазоні швидкостей контактна

взаємодія інструмента з оброблюваним матеріалом відносно стабільна, а інтенсивність зношування помірна.

Підвищення швидкості різання до приблизно 210 м/хв призводить до зміни характеру зношування інструменту, спостерігається інтенсивне формуванням лунки зносу по передній поверхні пластилини. Формування такої лунки супроводжується збільшенням площі контакту стружки з передньою поверхнею інструмента та зміною умов тертя, що, у свою чергу, призводить до одночасного зростання тангенційної та радіальної складових сили різання. Отримані результати свідчать про підвищення температури у зоні різання та активізацію адгезійно-дифузійних механізмів зношування інструменту. Такий характер зношування може бути пов'язаний з особливостями мікроструктури високоміцного чавуну, зокрема наявністю кулястого графіту, а також значною часткою твердих карбідних включень, які посилюють абразивний характер взаємодії у зоні різання.

Подальше збільшення швидкості різання до 420 м/хв призводить до інтенсифікації процесів зношування як по передній, так і по задній поверхні інструмента. Поряд із розвитком лунки зносу на передній поверхні спостерігається значне збільшення фаски зносу по задній поверхні, що свідчить про комплексний характер руйнування різальної кромки в умовах високих температур і навантажень.

Порівняльні дослідження показали, що при точінні сірого чавуну СЧ20 інструментом із РсВN підвищення швидкості різання до 400 м/хв не призводить до суттєвого зростання інтенсивності зношування. При тривалості обробки 7 хв величина фаски зносу по задній поверхні не перевищує 0,05 мм, що свідчить про значно більш сприятливі умови контактної взаємодії інструмента з матеріалом. Таким чином, характер зношування інструменту при обробці високоміцного та сірого чавунів істотно відрізняється. Аналіз експериментальних даних показав, що інтенсивність зношування інструменту при точінні високоміцного чавуну має нелінійний характер залежності від швидкості різання. При підвищенні швидкості різання від 100 до 200 м/хв інтенсивність зношування збільшується приблизно у 1,5 рази – від 173 до 260 мкм/км. Подальше підвищення швидкості різання до 400–420 м/хв призводить до ще більш різкого зростання інтенсивності зношування, яке досягає значення близько 520 мкм/км.

Отримані результати свідчать про суттєвий вплив швидкості різання на механізми контактної взаємодії та зношування інструменту з кубічного нітриду бору при обробці високоміцного чавуну та можуть бути використані для обґрунтування раціональних режимів обробки.

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

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ЗУБІВ РОЗПУШУВАЧА БАРОВОГО ЛАНЦЮГА

При капітальному ремонті залізничних колій і оновленні баластної призми використовують щибенеочисні машини глибокого очищення барового типу. Основним робочим органом цих машин, який вирізує і видаляє баласт з-під рейкошпальної решітки, є вигрібний пристрій, який оснащений баровим (вигрібним) ланцюгом. В роботі барової ланцюга важливу роль відіграють зуби розпушувача. Конструкція зуба складається з сталевого держателя та металокерамічного твердосплавного наконечника, що з'єднується з держателем. Існуючі, на даний час, технологія з'єднання твердосплавних головок (наконечників) із сплавом ВК8 з держателем зуба не відповідає сучасним вимогам по якості та продуктивності та використовує коштовні срібні припої.

Для усунення недоліків існуючої технології (низька продуктивність, висока собівартість, нестабільність якості з'єднання) та забезпечення потрібної міцності зварного з'єднання запропонована інноваційна технологія контактного зварювання опором, яка базується на використанні активуючих композитних прошарків згідно з патентами України UA78378C2 і США USA8,426,762 B2.

Композитний прошарок являє собою набір із профільованих металічних фольг, заповнених шаром флюсу. Прошарки встановлюються між деталями, що зварюються, і забезпечують флюсовий захист зони зварювання, активацію поверхонь і локальне плавлення металу в зоні контакту. При цьому в зоні з'єднання формується шов заданої товщини.

Цикл зварювання держателя із сталі 40Х та наконечника з твердого сплаву ВК8 починається з модуляції струму та його збільшення в другій частині циклу. Процес зварювання закінчують, коли температура прошарку з латуні Л63 досягає температури його плавлення. Розрахунки електричного опору зони зварювання показали, що на початку процесу розкид величини електричного опору складає 500–900 мкОм, а у другій половині знижується до 180–

210 мкОм, що дає підставу вважати процес стабільним. Контроль процесу здійснюється за допусками на зварювальний струм і температуру в місці зварювання в кінці першого імпульсу струму. Допуск на величину струму становить 6%, допуск на температуру – 3% від заданих значень.

Макроскопічними дослідженнями встановило, що товщина проміжного прошарку із латуні Л63 при оптимальному режимі зварювання становить 280–340 мкм. При цьому з'єднання має механічні властивості на зсув на рівні $\tau = 240\text{--}260$ МПа. Зменшення товщини прошарку підвищує залишкові внутрішні напруження, що призводить до зниження міцності зварного з'єднання на зсув. Металографічні дослідження зварних з'єднань методами оптичної мікроскопії та растрової електронної мікроскопії (РЕМ) показали відсутність дефектів, наявність вузької зони термічного впливу, допустиме зниження мікротвердості.

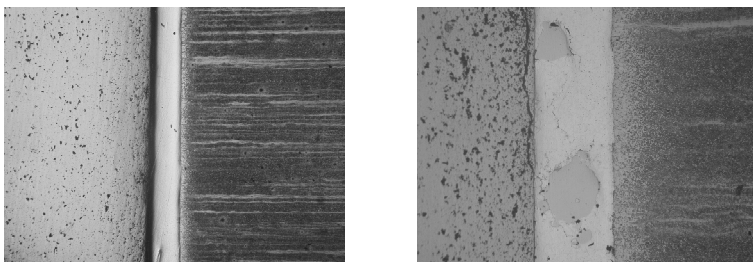


Рис. 1 – Макро- і мікроструктура з'єднання ВК8-Л63-сталь 40Х

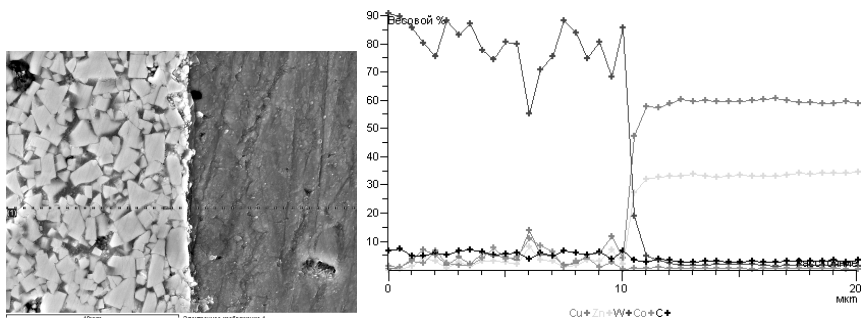


Рис. 2 – РЕМ-зображення зони з'єднання ВК8-Л63 і розподіл елементів

Дослідження та аналіз параметрів контролю та управління процесом контактного зварювання опором з композитним прошарком показали, що температура зони зварювання, яка вимірювалась датчи-

ком інфрачервоного випромінювання, корелює з якістю зварювання та може бути використана як параметр контролю та управління.

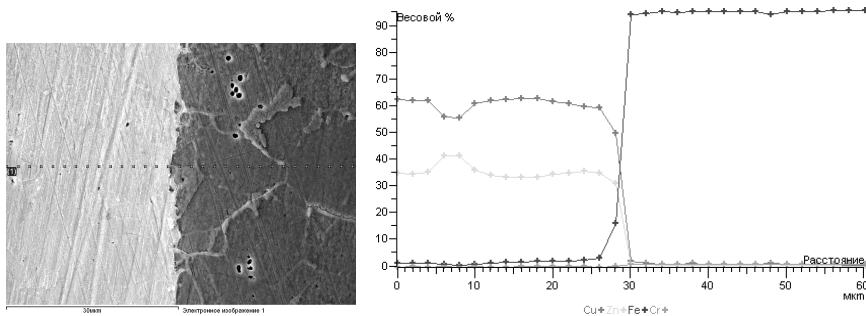


Рис. 3 – РЕМ-зображення зони з'єднання Л63–сталь 40Х і розподіл елементів

Контактне зварювання опором з активуючим композитним прошарком дозволяє отримати доброякісне з'єднання тврдосплавного матеріалу ВК8 із сталлю 40Х при виготовленні зубів розпушувача барового ланцюга з високою продуктивністю та низькою собівартістю.

Нерубацький В.П., Геворкян Е.С., Комарова Г.Л.
Український державний університет залізничного транспорту, Харків

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАНОКЕРАМІКИ ZrO_2-WC ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ І ТРАНСПОРТУ

Сучасна стратегія відновлення та інноваційного розвитку промислового комплексу України, зокрема залізничного транспорту, ґрунтується на інтеграції інтелектуальних технологій у процеси створення матеріалів із наперед програмованими властивостями. У цьому контексті особливої актуальності набуває забезпечення надійної роботи вузлів тертя та конструкційних елементів, що функціонують у критичних умовах: в агресивних середовищах та при інтенсивному кавітаційному зносі. Ефективне функціонування промислового сектору в сучасних умовах потребує впровадження зносостійких матері-

алів вітчизняного виробництва для зниження залежності від імпорту складників. Використання керамічних композитів дозволяє оптимізувати витрати на експлуатацію техніки та підвищити конкурентоспроможність українського машинобудування.

Шляхом проведення системного аналізу фізико-технологічних чинників та оцінювання економічних параметрів у даній роботі обґрунтовано, що перспективним рішенням для потреб різних галузей економіки є впровадження наноструктурованої кераміки системи ZrO_2-WC із високими показниками механічної стабільності. Розроблення наноструктурованої кераміки системи $ZrO_2(3 \text{ мол. \% } Y_2O_3)-WC$ методом електроконсолідації дозволяє не лише суттєво підвищити надійність критичних вузлів, але й забезпечити зниження енергоємності виробництва за рахунок використання швидкісних методів спікання.

Використання технології електроконсолідації (SPS/FAST) забезпечує формування безпористої структури з розміром зерен 60–90 нм, що досягається завдяки надшвидкому нагріву (150–200 °C/хв) та ефективному блокуванню рекристалізації частинками карбіду вольфраму.

Важливим етапом дослідження став аналіз умов і шляхів оптимізації фізико-технологічних та економічних параметрів, що дозволило встановити баланс між собівартістю енерговитрат та граничними механічними характеристиками матеріалу. Встановлено, що оптимізація режимів електроконсолідації дозволяє отримати матеріал із програмованими властивостями, адаптованими до конкретних умов експлуатації в агропромисловому комплексі, видобувній галузі та на транспорті. Процес ущільнення при електроконсолідації базується на поєднанні механічного тиску та дії потужних імпульсів електричного струму, що ініціює специфічні механізми масопереносу на контактах між частинками.

Моделювання кінетики ущільнення підтверджує, що при температурах близько 1700 °C оптимальний інтервал витримки становить до 5 хв, що є ключовим параметром для збереження нанодисперсного стану. Порівняльні характеристики розробленої нанокераміки представлені у табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що високі експлуатаційні властивості композиту забезпечуються ефектом трансформаційного зміцнення діоксиду цирконію. У зонах концентрації напружень відбувається фазовий перехід, що створює стискаючі зусилля, які блокують розвиток мікротріщин. Особливе місце у дослідженні посідає

застосування методів імітаційного комп'ютерного моделювання еволюції реальної структури матеріалу. На основі теорії в'язкої течії пористого тіла проведено серію модельних експериментів, які дозволили спрогнозувати розподіл температурних полів та градієнтів тиску під час активованого спікання. Моделювання підтвердило, що використання високодисперсних порошків у поєднанні з інтенсивним нагрівом дає змогу досягти теоретичної щільності при збереженні стабільної наноструктури, що забезпечує скорочення часу технологічного циклу виробництва деталей та зменшення собівартості робіт на 25–30%. Завдяки достатній електропровідності матеріал придатний до прецизійної електроерозійної обробки складних деталей. Метрологічне забезпечення контролю функціональних параметрів на всіх етапах виробництва гарантує високу відтворюваність властивостей.

Таблиця 1 – Експлуатаційні та фізико-механічні параметри нанокompозиту ZrO_2-WC

Показник	Твердий сплав (WC-Co)	Нанокераміка ZrO_2 (3 мол.% Y_2O_3)-WC	Технологічний ефект
Твердість (HV), ГПа	14–16	18–21	Підвищення зносостійкості
В'язкість руйнування, МПа·м ^{1/2}	10–12	8,5–10,0	Опір ударним навантаженням
Температура експлуатації, °C	до 800	до 1200	Термічна стабільність вузла
Відносна щільність, %	98,5–99,0	99,6–99,8	Герметичність та міцність
Екологічність	Токсичний (Co)	Екологічно безпечний	Безпека при зношуванні

Висновки. Впровадження нанокompозиційної кераміки ZrO_2-WC , синтезованої методом електроконсолідації, відкриває шлях до радикального підвищення експлуатаційної надійності транспортних систем та промислових об'єктів України. Використання імітаційного моделювання для прогнозування еволюції структури та метрологічного контролю забезпечує створення енергоефективних, екологічно безпечних та економічно доцільних технологій виробництва, що відповідає вимогам Smart Industry та потребам післявоєнного відновлення економіки держави.

*Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А.,
Базалій Г.А., Заболотний С.Д.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Сизоненко О.М. Інститут імпульсних процесів
і технологій НАН України, Миколаїв
Циба М.М. Інститут сорбції та проблем
ендоекології НАН України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ТА ФІЗИКО- МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ДЛЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ

Отримання та застосування високоякісних порошків з певними характеристиками потребує дослідження характеристик порошку різних марок та впливу нових методів їх модифікування [1]. Саме цей аспект зазначеного дослідження і становить мету даної роботи.

Дослідження проведено на зразках порошку алмазу марки АС20 та АС6 зернистістю 125/100, які синтезовано в системі Ni-Mn-C. Проведено модифікування порошку марки АС20 зернистістю 125/100 методом імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами (ВЕР) у дистильованій воді на експериментальному стенді із забезпеченням в каналі розряду сумарної енергії оброблення 1000 кДж при тиску 800 МПа; з наступним хімічним очищенням [2]. Адсорбційно-структурні характеристики визначали за допомогою газоадсорбційного аналізатора NOVA 2200 (Quantachrome, USA). Визначали ізотерму методом низькотемпературної адсорбції азоту (77 К) при рівноважному тиску ($p/p_s = 0,99$). Визначали питому площу поверхні, сумарний об'єм пор, середній радіус пор за теорією BET (Брунауера-Еммета-Теллера). Із застосуванням приладу DiaInspect.OSM фірми Vollstaedt Diamant GmbH та методів скануючої мікроскопії діагностували морфометричні характеристики [3]. Фізико-механічні, фізико-хімічні, морфометричні характеристики порошків алмазу визначали за державними нормативними документами. Порівнювали результати дослідження характеристик вихідних порошків та після їх модифікування. Результати дослідження подаються в табл. 1 та на рис. 1.

За результатами дослідження встановлено що: ізотерми 1, 2, 3 представлені ввігнутими кривими (тобто має місце слабка взаємодія адсорбат-адсорбент), що відповідає за класифікацією Брунауера

ізотермі 3 типу (див. рис. 1); в порівнянні з показниками вихідного порошку, застосування модифікування порошку призводить: до зміни фізико-механічних та фізико-хімічних характеристик. Зокрема середнє значення показників знижується відносно до показників вихідного порошку.

Таблиця 1 – Фізико-механічні, фізико-хімічні характеристики вихідних порошків алмазу марок АС20 та АС6 зернистістю 125/100 та зразку порошку марки АС20 зернистістю 125/100 після модифікування

Характеристики	Порошок зернистістю 125/100		
	вихідний порошок		марка АС20 (після модифікування)
	марка АС20	марка АС6	
Середнє значення міцності при статичному стиску зерен, Н	16,5	7,91	15,2
Масова частка домішок (неспалимий залишок), %	3,32	2,80	2,57
Питома магнітна сприйнятливість, $\times 10^{-8}$, м ³ /кг	3,56	9,73	2,87
Питомий електричний опір, Ом·м	$2,7 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10}$
Частка основної фракції зернового складу, %	70,3	73,0	75,3
Питома площа поверхні, м ² /г	0,4396	0,4175	0,3723
Питомий об'єм пор, 10^{-3} , см ³ /г	0,7211	1,483	0,6049
Середній радіус пор, нм	3,281	7,102	3,249

Міцність при статичному стиску зерен становить 92,12%, масова частка домішок (неспалимий залишок) – 72,19%, питома магнітна сприйнятливість 80,61%, питома площа поверхні – 84,8%, питомий об'єм пор – 83,89%, середній радіус пор – 99,1%. Частка основної фракції зернового складу зростає відносно до показників вихідного порошку і становить 100,1%; питомий електричний опір зростає на порядок. Порівняння показників вихідних порошків однієї зернистості 125/100 марок АС6 і АС20 показало, що при майже однакових показниках масової частки домішок, частки основної фракції зернового складу, питомого електричного опору, суттєво зменшується середнє значення міцності при статичному стиску зерен та питомої площі поверхні та зростає питомий об'єм пор, середній радіус пор та питома магнітна сприйнятливість. Морфометричні

характеристики вихідного порошку та порошку після модифікування майже не змінюються.

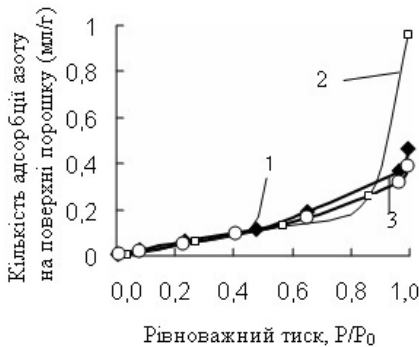


Рис. 1 – Ізотерми адсорбції азоту на поверхні порошків зернистості 125/100: 1 – вихідний порошок марки АС20, 2 – вихідний порошок марки АС6, 3 – порошок марки АС20 після модифікування

Таким чином, слід припустити, що порошки синтетичного алмазу з вище переліченими фізико-механічними та фізико-хімічними характеристиками повинні ефективно закріплюватися із складовими зв'язки абразивного інструменту, і сприяти ефективній роботі інструменту.

Література

1. Інструменти з надтвердих матеріалів / Під ред. М. В. Новикова. Київ: ІНМ НАНУ, 2001. 528 с.
2. Сизоненко О. Н., Олейник Н. А., Петасюк Г. А. та ін. Вплив електророзрядної обробки алмазних порошків на зміну їх фізико-механічних характеристик // Порошкова металургія. 2013. №7/8. С. 3–8.
3. Petasyuk G. A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders // Superhard Materials. 2010. Vol. 32, No. 2. P. 128–139.

ФОРМУВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ PCBN КОМПОЗИТІВ СИСТЕМИ cBN–TiC–Al

PCBN композити VL групи, призначення яких – високошвидкісна чистова обробка загартованих, легованих, жароміцних сталей і сплавів, характеризуються структурою, в якій розмір зерен фаз до 3 мкм, зерна cBN між собою, як правило, не контактують, об'ємний вміст cBN від 40 до 70%. Зв'язуючою фазою в таких композитах, як правило, виступають тугоплавкі сполуки титану.

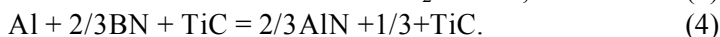
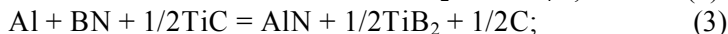
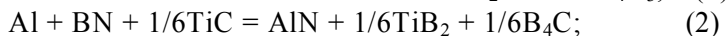
В даній роботі досліджено формування фазового складу двошарових PCBN композитів спіканні системи cBN–TiC–Al при реакційному спіканні за тиску 5,5 ГПа і температури 1600 °С в кубічному апараті високого тиску.

Фактори, що впливають на формування фазового складу композитів під час реакційного спікання з алюмінієм наступні: термодинамічні — тиск та температура спікання; кінетичні – дисперсність компонентів шихти, пористість і розмір пор стисненої шихти на початковому етапі спікання, розмір контактної поверхні між рідким алюмінієм і твердими компонентами шихти, швидкість підвищення температури під час нагрівання, градієнти тиску та температури в реакційному об'ємі. При тривалості високотемпературного спікання 10 хв фазовий склад композиту переважно формується в перші 3 хвилини і визначається ступенем нерівноважності умов в реакційному об'ємі, пов'язаних з тепловим розширенням компонентів комірки високого тиску, усадкою шихти, і пористих компонентів комірки високого тиску, деформацією твердосплавних підкладок.

В табл. 1 представлені результати рентгеноструктурних досліджень фазового складу композитів системи cBN–TiC–Al, отриманих із шихти складу 48% cBN (1–2 мкм), 46% TiC (1,0–1,5 мкм), 6% Al (1,0–1,5 мкм). Представлені два варіанти фазового складу: варіант 1 – напівкількісний аналіз інтенсивності піків на рентгенограмах; варіант 2 – з використанням даних напівкількісного аналізу, розрахунку балансу мас при хімічній взаємодії компонентів шихти в процесі спікання, використання раніше побудованих калібрувальних графіків для пар cBN – одна із зв'язуючих фаз.

Згідно з даними напівкількісного аналізу, композит складається з трьох фаз – з BN, TiC та TiB₂. У двох з 7-ми зразків композитів системи з BN–TiC–Al (зразки 5–92 та 6–94) виявлено четверту фазу – AlN. У продуктах реакції п'яти зразків ми виявили сполук алюмінію, незрозуміла ситуація з вуглецем.

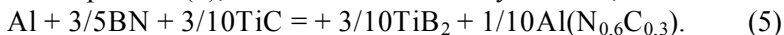
Пояснення такого фазового складу композитів можливе, якщо внаслідок хімічної взаємодії утворюються тверді розчини на основі сполук титану TiC та TiB₂. Можливі хімічні взаємодії між компонентами шихти наведені нижче:



Таблиця 1 – Фазовий склад PCBN композитів системи cBN–TiC–Al, отриманих із шихти складу 48% cBN (1–2 мкм), 46% TiC (1–1,5 мкм), 6% Al (1–1,5 мкм)

№ зразка	1–56	2–74	3–77	4–83	5–92	6–94	7–95
Фаза	Фазовий склад, % інтенсивності						
cBN	29,19	30,93	27,46	27,98	26,89	28,00	28,84
TiC	64,72	64,98	66,98	66,62	65,27	61,01	65,70
TiB ₂	6,08	4,09	5,56	5,40	6,14	8,48	5,45
AlN	–	–	–	–	1,70	2,50	–
Фаза	Фазовий склад, масові						
cBN	46,1	44,7	44,8	45,5	44,5	44,8	45,3
TiC	48,3	50,7	50,1	49,1	46,7	44,3	49,3
TiB ₂	5,6	4,6	5,1	5,4	5,5	5,9	5,4
AlN	–	–	–	–	3,3	5,0	–
Підкладка	BK13	BK8	BK8	BK13	BK6	BK3	BK8

Аналіз результатів рентгеноструктурного аналізу (фазовий склад, параметри ґраток фаз) приводять до висновку, що хімічна взаємодія проходить по реакції (1), але в дещо зміненому вигляді, а саме:



Замість двох фаз = AlN і Al₄C₃ утворюється твердий розчин на базі ґратки AlN, але не зі структурою вюртциту, а кубічної типу NaCl (фаза високого тиску) Al(N_{0,6}C_{0,3}) – кубічна фаза (Fm3m) – твердий розчин вуглецю в кубічному нітриді алюмінію.

Кубічний нітрид алюмінію – фаза високого тиску, стабільна при тисках більше 10 ГПа, але може бути стабілізована фазами тієї ж си-

метрії з близькими параметрами ґратки. У нашому випадку це TiN, TiC, TiCN. Параметр ґратки кубічного AlN–0,4080–0,4135 нм, близький до TiN (0,4248 нм). Найчастіше для стабілізації кубічного AlN використовується саме TiN, але годяться і TiC, TiCN. У разі зародками для кристалізації кубічного AlN служив TiC. Механізм утворення нової фази – кристалізація з розчину в рідкому алюмінії нової фази складу $Ti_xAl_yN_zC_kO_m$, в металевій решітці титан і алюміній, в неметалевій – азот, вуглець, кисень. Найімовірніший склад нової фази – $Ti_{0,5}Al_{0,5}N_{0,3}C_{0,6}O_{0,1}$. Це високоентропійна сполука, що кристалізувалося з рідкого алюмінію на TiC зародках, термодинамічно стійка в широкому інтервалі температур завдяки високій ентропії змішування.

Який фазовий склад кращий для композиту? Утворення високоентропійного твердого розчину на основі TiC підвищує твердість та стійкість до окислення композиту. Однак гексагональний AlN це м'яка подушка, амортизатор між твердими складовими композиту, такими як cBN, TiC, TiB₂. Вибір складний. Для гладкого точіння краще наявність високоентропійної складової, для точіння з ударом краща наявність AlN у структурі.

Висновки.

1. При термобаричному реакційному спіканні шихти системи cBN–TiC–Al на твердосплавній підкладці з 8 – 13 % C утворюється трьохфазний PCBN композит, де поряд з кубічним нітридом бору складна фаза на основі TiC, значна частина якої – високоентропійна сполука $Ti_xAl_yN_zC_kO_m$. Третя складова – твердий розчин TiB₂–AlB₂.

2. При використанні твердосплавних підкладок з 3 та 6% кобальту у складі PCBN композиту з'являється четверта фаза – AlN, кількість якої збільшується із зменшенням кобальту у твердому сплаві підкладки.

3. Перевага трифазного композиту – вищі твердість і стійкість до окислення, чотирифазного – більш висока в'язкість руйнування. Тому для гладких операцій точіння рекомендується трифазний композит, для точіння з ударом чотирифазний.

ВІД АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРЕН ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ 3D ЇХ ФОРМИ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ОКРЕМИХ МОРФОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕЛЕМЕНТІВ ШІ-ТЕХНОЛОГІЙ

3D форма зерен шліфпорошків синтетичного алмазу (СА), є важливою ознакою їх якості. Знання цієї характеристики може бути корисним при виборі способів і сфер найбільш ефективного використання порошків СА в абразивній обробці. Особливо актуальною 3D форма зерен є у випадку високоміцних шліфпорошків СА, призначених для використання в буровому інструменті [1] та в прецизійному інструменті для правки [2].

Впродовж тривалого часу в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України проводяться дослідження зі створення опосередковано-аналітичних методів визначення показників технологічних властивостей (ТВ) шліфпорошків СА. До переліку ТВ нами відносяться характеристики різальних кромки, зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті, показники зернового складу шліфпорошків, товщина і ступінь покриття. У наших публікаціях завжди наголошується на тому, що термін „технологічні властивості” жодним чином не стосується способів застосування шліфпорошків СА. Він лишень указує на те, що та чи інша ТВ формується із застосуванням певної технології впливу на продукт синтезу алмазу чи на виготовлений із нього первинний шліфпорошок – чи то диспергування, чи то його розділення (ситове, флотаційне, вібраційне за 3D формою зерен, магнітне сепарування), чи то нанесення на поверхню зерен різного виду покриттів.

3D форма зерен також є важливим методологічним елементом опосередковано-аналітичного діагностування (визначення) показників багатьох ТВ шліфпорошків СА. Початковими даними для застосування уже створених і створюваних нових методів є морфометричні характеристики шліфпорошків СА, які у нашому випадку отримуються за допомогою приладу DiaInspect.OSM фірми VOLLSTADT DIMANT GmbH (Німеччина) [3].

Окремим напрямком щодо зазначених вище опосередковано-аналітичних методів є розроблення алгоритмів автоматизованої ідентифікації формоподібності проекції зерен порошків СА. За цим напрямком створено оригінальний алгоритм пошуково-аналогової ідентифікації і оцінювання формоподібності проекції зерен порошків СА за 12-ма базовими аналогами можливої форми їхньої проекції. На відміну від сукупності базових аналогів проекції зерна, якою оперували у попередніх версіях пошуково-аналогового методу і яка налічувала 10 базових фігур-аналогів, до запропонованого нового переліку було додані дві нові базові форми проекції – напівправильні восьми- та дванадцятикутники. Саме таку форму проекції дає усічений октаедр [4]. З іншої сторони 3D форму усіченого октаедра поряд з октаедром та кубооктаедром мають зерна-кристали високоміцних шліфпорошків СА.

Створене за розробленими алгоритмами комп'ютерно-програмне забезпечення має доволі розлогу структуру і містить велику кількість обчислювальних та логічних процедур, в тому числі і на рівні прийняття рішень. Це, зокрема, стосується визначення простих ознак формоподібності проекції окремого аналізованого зерна, узагальнення простих ознак формоподібності, віднесення проекції до тієї чи іншої базової фігури, накопичення та обробка подібної інформації для всієї сукупності зерен досліджуваної проби шліфпорошку. Все зазначене вище виконується в автоматизованому програмному режимі і (підпадає під сферу діяльності) може бути кваліфіковано як застосування елементів штучного інтелекту (ШІ).

Наявність таких науково-методичних комп'ютеризованих засобів дозволила вирішити завдання автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків СА [5]. В свою чергу це дозволило розробити нові опосередковано-аналітичні методи визначення таких ТВ високоміцних шліфпорошків СА як зовнішня питома поверхня та характеристики різальних кромок [6, 7].

Для прикладу нижче подаються (табл. 1) критерії та теоретичні значення деяких морфометричних характеристик високоміцних шліфпорошків СА, важливих для автоматизованої ідентифікації 3D форми їхніх зерен (кристалів). Алгоритм такої ідентифікації полягає у наступному. За показником диференціальної формоподібності з максимальним його значенням для зерна (кристала), 3D форма якого ідентифікується, фіксується (встановлюється) відповідна форма проекції (її базовий аналог) із переліку прийнятої базової їх сукупності (алгоритм описаний в роботі [8]). Саме цей найбільш бли-

зький аналог і приймається як ідентифікована форма фактичної проекції відповідного зерна. Шукаємо цю ідентифіковану форму фактичної проекції у першій колонці табл. 1. У другій колонці табл. 1 в тій же її стрічці перевіряємо, чи попадає фактичне значення показника Фере-подовження проекції зерна в приведений у другій колонці табл. 1 інтервал його значень. Потім таж сама дія виконується і для відносної долі світлої (прозорої) частини проекції цього зерна в загальній її площі щодо попадання фактичне значення показника цієї характеристики у приведений у третій колонці табл. 1 інтервал її значень. Якщо ці дві умови виконуються, то назва 3D фігури, зазначена на перетині цієї стрічки табл. 1 із четвертою її колонкою і буде ідентифікованою 3D формою зерна, що аналізується. Якщо ж жодний із критеріїв, зазначених у табл. 1 не виконується, то це зерно відносять до окремої четвертої фракції (решта зерен). Як бачимо, всі ці дії підлягають під означення і завдання елементів III. Додамо, що фізична сутність і геометрична інтерпретація зазначених у табл. 1 окремих морфометричних характеристик абразивних порошків докладно подається в робочій інструкції до приладу DiaInspect.OSM а також в наших роботах (наприклад, в [5, 9]).

Таблиця 1 –Таблиця критеріїв та теоретичні значення (в дужках) окремих морфометричних характеристик високоміцних шліфпорошків СА, важливих для автоматизованої ідентифікації 3D форми їхніх зерен (кристалів)

2D форма проекції	Фере-подовження проекції зерна F_{el}	Відносної долі світлої (прозорої) частини проекції зерна в загальній її площі A_{lg}	3D форма зерна
Правильний шестикутник	$1,135 \leq F_{el}$ (1,155) $\leq 1,135$	$0,320 \leq A_{lg}$ (0,333) $\leq 0,354$	октаедр
Правильний шестикутник	$1,125 \leq F_{el}$ (1,155) $\leq 1,515$	$0,157 \leq A_{lg}$ (0,167) $\leq 0,187$	кубооктаедр
Квадрат	$1,125 \leq F_{el}$ (1,414) $\leq 1,515$	$0,400 \leq A_{lg}$ (0,500) $\leq 0,600$	
Напівправильний дванадцятикутник	$1,015 \leq F_{el}$ (1,02) $\leq 1,031$	$0,360 \leq A_{lg}$ (0,375) $\leq 0,385$	усічений октаедр
Напівправильний восьмикутник	$1,118 \leq F_{el}$ (0,143) $\leq 1,160$	$0,123 \leq A_{lg}$ (0,143) $\leq 0,166$	

Таблиця 2 – Кількість зерен в кожній із чотирьох ідентифікованих фракцій високоміцного шліфпорошку АС400 500/400

Фракції шліфпорошку за 3D формою зерен	Кількість зерен у фракції, шт.
Октаедр	7
Кубооктаедр	37
Усічений Октаедр	194
Решта Зерен	7

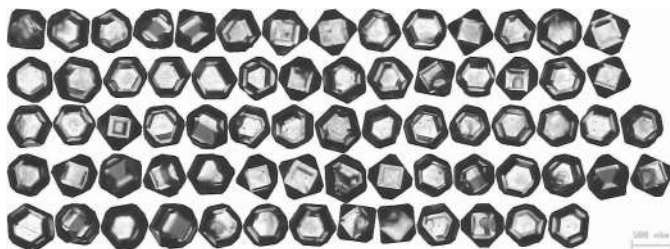


Рис. 1 – Фрагмент DiaInspect-фотографії зерен досліджуваного високоміцного шліфпорошку синтетичного алмазу АС400 500/400

Як приклад застосування створеного нового методу автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен порошків СА в табл. 2 подаються результати ідентифікації 3D форми зерен високоміцного шліфпорошку АС400 500/400. Фрагмент DiaInspect-фотографії проби цього шліфпорошку кількістю 245 шт. зерен подається на рис. 1. Візуальний аналіз цієї фотографії та представлених у табл. 2 результатів дозволяє зробити висновок про хорошу достовірність автоматизованої ідентифікації 3D форми зерен контрольного шліфпорошку.

Література

1. Исонкин А.М., Ильницкая Г.Д., Зайцева И.Н. Влияние дефектов алмазов на работоспособность буровых коронок // Сб. науч. трудов «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». Вып. 20, 2017. С. 130–137.
2. Лавриненко В.И., Петасюк Г.А., Сухарев Д.В. Морфометрические характеристики монокристаллов синтетического алмаза как критерий равномерности износа прецизионных алмазных правящих роликов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Харьков, 2012. Вып. 81. С. 162–169.

3. YUMPU. DiaInspect.OSM – Vollstaedt-Diamant GmbH. Available from: <https://www.yumpu.com>

4. Гордеева Є.П., Величко В.Л. Нарисна геометрія. Багатогранники (правильні, напівправильні та зірчасті). Частина I: навч. посіб. Луцьк: Ред.-видавн. відділ ЛДТУ, 2007. 198 с.

5. Петасюк Г.А., Бочечка О.О. Автоматизована ідентифікація 3D форми зерен високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу // Надтверді матеріали. 2025. № 3. С. 79–93.

6. Petasyuk G.A. Methodological Features of Determining the External Specific Surface Area of High-Strength Synthetic Diamond Grinding Powders // Journal of Coating Science and Technology. 2025. Vol. 12. P. 1–9.

7. Петасюк Г.А., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Сирота Ю.В. Методичні особливості кількісного аналізу характеристик різальних кромок високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу // Надтверді матеріали. 2025. № 5. С. 73–87.

8. Петасюк Г.А., Бочечка О.О., Сирота Ю.В. Розширення прикладних можливостей пошуково-аналогового методу ідентифікації форми проекції зерен абразивних порошоків // Надтверді матеріали. 2021. № 5. С. 78–89.

9. Богатирева Г.П., Петасюк Г.А., Базалий Г.А., Шамраєва В.С. К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфометрическим характеристикам // Сверхтвердые материалы. 2009. №2. С.71–81.

Петасюк Г.А., Лавріненко В.І., Полторацький В.Г.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакула
НАН України, Київ

МІКРО- ЧИ НАНО: ЯКОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ПОРОШКИ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ БАЖАНО ЗАСТОСОВУВАТИ ДЛЯ ПОКРИТТЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ ДЛЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ: МОРФОМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД

В машинобудуванні порошки синтетичного алмазу невеликої міцності марок АС6–АС20 широко застосовуються в процесах механообробки, однак працездатність будь-якого алмазомісткого інструменту значною мірою визначається станом робочої поверхні зерен шліф-

порошку алмазу. Одним з варіантів досягнення цього є створення зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу збільшеної, з вказаного вище діапазону, міцності з мікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору та речовин з підвищеними адгезійними властивостями – неорганічних та органічних. Метою такого покриття є створення захисного бар'єру між зв'язкою та зерном для уникнення графітизації алмазу як при виготовленні, так і при застосуванні (шліфування). І ще одна мета – це також збільшення величини питомої поверхні алмазних зерен та покращення завдяки цьому надійності утримання зерен в зв'язці та створення передумов для використання більш міцних, з вказаного вище діапазону, шліфпорошків синтетичного алмазу в шліфувальних кругах на полімерній зв'язці для обробки твердих сплавів. Покриття утворювалося методом рідиннофазного нанесення в процесі кристалізації або ущільнення розчинних компонентів з комбінованого розчину-суспензії. До складу покриття можуть входити порошки кубічного нітриду бору (КМ 3/2 або КМ нано) та оксид бору (B_2O_3), силікат натрію (Na_2SiO_3), полівініловий спирт, полівінілбутіраль фенолформальдегідний, гідролізований колаген у різних поєднаннях.

В повідомленні [1] нами основна увага приділена питанню: якої дисперсності порошки кубічного нітриду бору бажано застосовувати для вказаного вище покриття з точки зору застосування в шліфувальному інструменті. Було встановлено:

1. В обох випадках нанесення покриття з кубічного нітриду бору КМнано та КМ 3/2 на поверхню алмазних зерен дозволяє знизити знос алмазних кругів.

2. Встановлено, що нанесення покриття КМнано дозволяє фактично втричі зменшити знос алмазних кругів, а КМ 3/2 – вдвічі.

3. Разом з тим, встановлено, що в усіх випадках наявність покриття на поверхні алмазних зерен призводить до погіршення шорсткості обробленої поверхні – показник *Ra* зростає. Але знову ж таки, при покритті КМнано це зростання є не таким відчутним, як при покритті КМ 3/2.

Таким чином, показано, що нанесення на поверхню алмазних зерен збільшеної в межах порошків марок АС6–АС20 міцності покриття з кубічного нітриду бору дозволяє відчутно підвищити зносостійкість алмазних кругів, що може бути викликано покращенням утримання у зв'язуючому таких алмазних зерен збільшеної міцності. Але тепер поглянемо на питання порівняння покриття з кубічного нітриду бору КМнано та КМ 3/2 на поверхню алмазних

зерен з точки зору їх морфометричних характеристик, як саме тут різняться ці покриття на алмазних зернах (табл. 1).

Таблиця 1 – Морфометричні характеристики і однорідність початкового шліфпорошку (AC15 160/125) та з нанесеними на поверхню його зерен покриттями $B_2O_3+KM\ 3/2+ПВС$ (Zrazok 8) і $B_2O_3+KM\ 3/2$ нано (Zrazok 10)

Морфометричні характеристики	Початковий		З покриттям			
	AC15 160/125 початковий		Zrazok 8, $B_2O_3+KM\ 3/2+ПВС$		Zrazok 10 $B_2O_3+KM\ 3/2$ нано	
	с. з.	одн.	с. з.	одн.	с. з.	одн.
F_{max} , МКМ	217,75	0,8216	225,40	0,7993	226,49	0,7897
F_{min} , МКМ	175,27	0,9557	177,40	0,9551	178,40	0,9546
Comp.	1,2804	0,7296	1,2844	0,7524	1,2989	0,7729
H	126,14	0,9557	134,06	0,9551	128,97	0,9546
Ellipt.	1,2064	0,6325	1,2323	0,6200	1,2330	0,5906
F_{elong} .	1,2424	0,6753	1,2712	0,6599	1,2700	0,6283
F_{upl} .	0,5804	0,8576	0,5468	0,8496	0,5848	0,8324
Roughn.	1,0684	0,7289	1,0694	0,7398	1,0728	0,7507
D_m , МКМ	196,51	0,8336	201,40	0,7604	202,45	0,7530
D_e , МКМ	187,32	0,9035	192,44	0,8526	192,46	0,8447
A_{Tot} , МКМ ²	27641	0,7978	29218	0,7816	29234	0,7764
Prm , МКМ	665,89	0,8243	684,96	0,8311	689,37	0,8261
$Prmc$, МК	622,99	0,8443	640,27	0,7885	642,36	0,7710
P_{ud} , 1/М	0,0242	0,8613	0,0236	0,8632	0,0238	0,8610
relAreal	0,2034	0,4112	0,0656	0,5106	0,0507	0,3397
$F_{шт}$, М ² /КГ	24,69	–	24,98	–	23,96	–
N , шт,	22714	–	24535	–	21815	–
n , шт,	13,7	–	13,2	–	13,2	–
ϕ , град,	111,18	–	111,50	–	111,11	–

Виходячи із порівняльного аналізу даних табл. 1. можемо зробити наступні висновки, щодо „позитиву” $B_2O_3+KM\ 3/2$ нано (Zrazok 10) у порівнянні із зразком $B_2O_3+KM\ 3/2+ПВС$ (Zrazok 8):

1. Розмірні характеристики дещо більші, тобто зерна більш крупніші. Однорідність за розмірними характеристиками менша.

2. Из-за того, що зерна більш крупніші, питома площа поверхні менша, число зерен в одному карату також менше.

3. Шорсткість проекції зерен більша, однорідність за цією морфометричною характеристикою також більша, що сприяє кращому утриманню зерен в ризальному шарі абразивного інструменту.

4. Окремо звернемо увагу на показник $relA_{real}$ – відносної долі світлої частини проекції зерна в загальній площі проекції. З табл. 1 видно, що тут найбільше значення показника у вихідного непокритого алмазного зерна (що є цілком очікувано), а найменше – у покриття КМнано. Це свідчить про кращу якість саме цього покриття. А більш реально ми можемо побачити це з фотографій алмазних зерен (рис. 1), де більш світла частина проекції зерна проглядається у зерен із покриттям КМ 3/2.

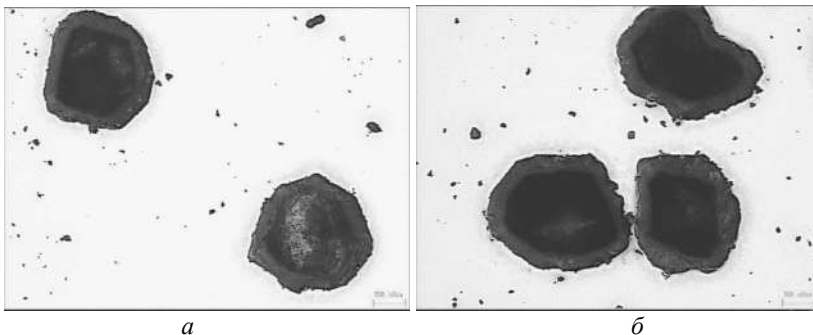


Рис. 1 – Зображення алмазних зерен АС15 160/125 з покриттям КМ3/2 (а) та покриттям КМнано (б)

В табл. 2 наведені показники диференціальної формодібності, похибка формозаміни проекції зерен та однорідність за формоподібністю проекції зерен шліфпорошків АС15 160/125. Видно, що однорідність за формоподібністю у покриття КМнано є найвищою, а значно менша частка зерен із овалоподібною формою проекції знову ж таки сприяє кращому утриманню зерен в різальному шарі абразивного інструменту. В табл. 3 наведені показники покриву алмазних зерен.

З табл. 2 та 3 видно, що у випадку КМнано ступінь покриття менший, а з ним і товщина покриття також менша. Більша кількість зерен із проекцією у формі прямокутника, трапеції, напівправильних дванадцятикутника та восьмикутник. Вищий показник однорідності за формоподібністю проекції зерен. Менша відносна кількість зерен із проекцією у формі овалоподібних фігур (коло+еліпс), що знову ж таки сприяє кращому утриманню зерен в різальному шарі абразивного інструменту.

Таблиця 2 – Показники диференціальної ($f_k^{(n)}$, %) формодібності, похибка формозаміни ($\Delta_k^{(n)}$, %) проєкції зерен та однорідність (μ_{fpz} , %) за формоподібністю проєкції зерен) шліфпорошків AC15 160/125

Базові фігури-аналоги	AC15 160/125 початковий		AC15 160/125 Покрив основна фракція			
			Zrazok 8 B ₂ O ₃ + КМ 3/2 + ПВС		Zrazok 10 B ₂ O ₃ + КМнано	
	$f_k^{(o)}$	$\Delta_k^{(n)}$	$f_k^{(o)}$	$\Delta_k^{(n)}$	$f_k^{(o)}$	$\Delta_k^{(n)}$
1	11,11	0,1562	15,77	0,1618	7,32	0,1740
2	36,59	0,1723	39,58	0,1702	42,37	0,1744
3	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
4	16,09	0,1042	16,37	0,1006	18,35	0,1028
5	6,13	0,1036	4,46	0,1143	4,43	0,0996
6	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
7	1,34	0,2444	3,27	0,2524	3,40	0,2604
8	1,53	0,0442	0,00	0,0000	0,00	0,0000
9	0,96	0,2796	0,60	0,3001	0,52	0,2782
10	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
11	9,20	0,0594	5,65	0,0679	7,42	0,0664
12	17,05	0,0936	14,29	0,0983	16,19	0,1026
μ_{fpz}	27,46		22,79		33,07	

Таблиця 3 – Результати обчислення середнього об'єму зерен початкового і модифікованих шліфпорошків, ступеню і товщини їх покриття та середні значення необхідних для цього морфометричних характеристик

Характеристики	Початковий AC15 160/125	покриття	
		Zrazok_8 B ₂ O ₃ + КМ 3/2 + ПВС	Zrazok_10 B ₂ O ₃ + КМнано
$v/100, \text{мкм}^3$	23348	26170	25198
$\rho, \text{г/см}^3$	3,51	3,26	3,13669
$F_{\text{max}}, \text{МКМ}$	217,75	225,40	226,49
$F_{\text{min}}, \text{МКМ}$	175,27	177,40	178,40
$H, \text{МКМ}$	126,14	134,06	128,97
Roughn	1,0684	1,0694	1,0728
$A_s, \text{МКМ}^2$	27641	29218	29234
$P, \text{МКМ}$	665,89	684,96	689,37
$F_{\text{пт}}, \text{М}^2/\text{кг}$	24,98	23,96	24,69
$N, \text{шт}$	24535	21815	22714
$n, \text{шт}$	13,2	13,2	13,7
$\phi, \text{град}$	111,50	111,11	111,18
$\mu_{fpz}, \%$	27,46	22,79	33,07
$\mu, \%$	—	11,22	7,07
$h, \text{МКМ}$	—	3,97	1,9885

Таким чином, порівняльний аналіз морфометричних характеристик двох досліджуваних з нанесеними різними покриттями шліфпорошків синтетичного алмазу збільшеної міцності дозволяє частково пояснити переваги покриття КМнано щодо зменшення питомої витрати абразиву. Такій його перевазі сприяють на наш погляд в значній мірі більші показники шорсткості проекції зерен разом із більшою однорідністю за цією морфометричною характеристикою та питомого периметру проекції – в меншій мірі. Також цьому сприяє і менша відносна кількість зерен з овалоподібною проекцією зерен, які гірше утримуються в різальному шарі абразивного інструменту у порівнянні із зернами, проекція яких має форму полігональних фігур.

Література

1. Лаврінченко В. І., Полторацький В. Г., Смоквина В. В., Бологов П. І., Кошкін О. М., Білорусець В. В., Cherevuk O. Мікро- чи нано-: якої дисперсності порошки кубічного нітриду бору бажано застосовувати для покриття поверхні зерен шліфпорошків алмазів для шліфувального інструменту // Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: Матер. 25-ї Міжн. наук.-практ. конф., 22–26 вересня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2025. С. 56–59.

Равлюк В.Г. Український державний
університет залізничного транспорту, Харків

ПРОАКТИВНЕ МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕТАПУ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

Етап підготовки виробництва часто недооцінюється як зона формування майбутньої точності, стабільності та керованості технологічних процесів. Водночас саме на цій стадії визначаються вимоги до засобів вимірювання, закладається структура контролю параметрів, формується зв'язок між технологічними рішеннями та метрологічною достовірністю. Саме тому процеси підготовки виробництва доцільно розглядати з позицій метрологічного забезпечення вимірювальних операцій, а методи, засоби та організаційно-методичні підходи до забезпечення вимірювань – як одну з ключових умов підвищення точності та достовірності вимірювальної інформації, зниження метрологічних ризиків і підвищення ефективності виробничих

процесів. У такому контексті особливого значення набувають нормативно-правова та стандартна база у сфері метрології й управління якістю, аналіз чинної практики організації вимірювального контролю, а також оцінювання існуючих методів і засобів вимірювання, що застосовуються на етапі підготовки виробництва.

Однією з найважливіших особливостей такого підходу є розгляд метрологічного забезпечення як багатофункціональної системи, що має нормативну, технічну, методичну, контрольну та інформаційну складові. Особливе значення в цій системі має простежуваність вимірювань як умова відповідності продукції міжнародним стандартам і контрактним вимогам, передусім для підприємств, інтегрованих у глобальні виробничі ланцюги. Водночас акцент зміщується від фрагментарного вимірювального супроводу до інформаційно-аналітичної системи, у межах якої автоматизований збір даних, цифрові датчики та інтеграція з інформаційними системами підприємства дають змогу не лише фіксувати параметри, а й прогнозувати відхилення технологічних процесів. У сучасному стані організації такого забезпечення досить виразно проявляються типові проблеми: недостатній рівень методичного супроводу, обмежена участь метрологічної служби на ранніх етапах, слабка взаємодія між технологами, конструкторами й метрологами, а також недостатнє використання цифрових технологій. Саме ці чинники визначають потребу в системному вдосконаленні підходів до метрологічного супроводу підготовки виробництва.

Метрологічне забезпечення на цьому етапі доцільно розглядати не як допоміжну технічну функцію, а як складову стратегічного виробничого менеджменту. Його зміст пов'язується з удосконаленням організаційної структури, розвитком методичного забезпечення вимірювань, оптимізацією складу засобів вимірювання та впровадженням елементів автоматизації. Такий підхід орієнтований на створення проактивної системи, здатної попереджати похибки й невідповідності ще до того, як вони трансформуються у виробничі втрати, брак або нестабільність технологічних режимів. У підсумку якість підготовки виробництва безпосередньо пов'язується з якістю метрологічного супроводу, а ефективність сучасного промислового підприємства значною мірою залежить від того, наскільки рано і наскільки системно метрологія інтегрується в логіку прийняття виробничих рішень.

Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.
2. Закон України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 № 1315-VII.
3. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015 № 124-VIII.
4. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги.
5. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи управління вимірюваннями. Вимоги до вимірювальних процесів і вимірювального обладнання.
6. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
7. ДСТУ ISO 31000:2018. Управління ризиками. Принципи та настанови.

Равлюк В.Г. Український державний
університет залізничного транспорту
Захаров А.В. Харківський державний професійно-
педагогічний фаховий коледж
імені В. І. Вернадського, Харків

АДАПТИВНІ ПІДХОДИ ДО МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПІДТРИМКИ НЕСТАНДАРТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ У РЕМОНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Сучасні виробничі та ремонтні процеси дедалі частіше потребують застосування нестандартних засобів вимірювальної техніки, оскільки серійні промислові прилади не завжди здатні забезпечити необхідну точність, швидкодію, діапазон вимірювання або конструктивну адаптованість до складних умов експлуатації. Особливо гостро ця проблема проявляється у сфері ремонту й відновлення деталей машин і механізмів, зокрема пар тертя, де контроль геометричних, мікрогеометричних і функціональних параметрів безпосередньо впливає на якість ремонту, надійність відновлених вузлів і ресурс техніки. Саме тому нестандартні засоби вимірювальної техніки, що застосовуються у виробничих, ремонтних і контрольних процесах, доцільно розглядати як специфічний об'єкт метрологічного забезпечення, для якого особливого значення набувають методи, засоби та організаційно-методичні підходи, спрямо-

вані на забезпечення точності, відтворюваності та достовірності результатів вимірювань.

Специфіка нестандартних вимірювальних засобів полягає в тому, що вони, як правило, не мають серійних аналогів, часто функціонують у складних або екстремальних умовах, не підпадають під типові процедури повірки й калібрування та потребують індивідуалізованого підходу до метрологічного забезпечення. За таких умов особливої актуальності набуває формування адаптивних підходів, які включають індивідуальний підбір еталонної бази, розроблення спеціальних методик вимірювань, дослідження умов експлуатації, урахування впливу зовнішніх факторів, побудову корекційних моделей і застосування цифрових та інтелектуальних засобів компенсації похибок. Окремого значення набувають питання простежуваності результатів вимірювань, відсутності уніфікованих нормативних документів для нестандартних засобів, а також необхідності метрологічної експертизи, належного документування і системного управління життєвим циклом нестандартних вимірювальних систем. У такому розумінні метрологія постає не як статична процедура перевірки, а як динамічна система підтримки достовірності вимірювань в умовах технологічної невизначеності та змінності виробничого середовища.

Проблематика метрологічного забезпечення в цьому випадку безпосередньо пов'язується з ремонтним виробництвом, де особливого значення набувають аналіз методів і засобів вимірювання параметрів пар тертя, оцінювання чинної системи вимірювального контролю технічного стану деталей, виявлення проблемних аспектів контролю, аналіз ризиків недостовірності вимірювань і вдосконалення засобів вимірювання. Найбільш доцільними напрямками вдосконалення в таких умовах є оновлення методик калібрування та атестації, розроблення системи контролю стабільності метрологічних характеристик, використання цифрових і автоматизованих засобів, оцінювання невизначеності вимірювань, зниження метрологічних ризиків та впровадження організаційно-методичних заходів, спрямованих на підвищення надійності вимірювального контролю. Комплексне застосування таких підходів забезпечує не лише зростання точності вимірювань, а й покращення організації виробничих процесів, зниження кількості повторних вимірювань, підвищення керованості ремонтних операцій і переведення виробничих ризиків із підвищеного в контрольований стан. Саме тому адаптивна метрологічна підтримка нестандартних вимірювальних

систем є однією з визначальних умов якісного, безпечного та економічно обґрунтованого ремонтного виробництва.

Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.
2. Закон України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 № 1315-VII.
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

*Рябченко С.В., Бандуренко М.В., Клименко С. Ан.,
Чумак А.О.* Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

ВИГОТОВЛЕННЯ КАТОДІВ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Розробка та виготовлення спеціальних катодів для напилення жароміцних сплавів має дуже складну задачу. Такі катоди призначені для напилення надтвердих керамічних матеріалів з високим тепловим навантаженням на деталі із жароміцних сплавів. В зв'язку, що катод для напилення надтвердих керамічних матеріалів є складним виробом та має в складі різні матеріали, виникла необхідність виготовлення спеціального катоду.

Конструкція катоду мала дві частини – мішені з спеціального сплаву та опори з міді. Для виготовлення катоду для напилення використовувалась спеціальна пластина-мішень діаметром 70 мм та висотою 4 мм, яку було замовлено у закордонного виробника – фірми FANMETAL TECH CO LTD (Чженчжоу, Хенань, Китай. Заготовка мішені не може мати в собі небажаних домішок, а тільки порошки вольфраму (45%), титану (20%), ітрію (10%), танталу (15%), молібдену (10%) високої чистоти.

Мішень необхідно закріпити до базової поверхні – опори катоду, яка виготовлялась із порошку міді ПМС, шляхом пресування та наступної механічної обробки.

Після виготовлення опори катоду, на неї необхідно закріпити пластину. Спеціальну пластину припаяли газовою горілкою до базової поверхні припоем із срібла ПСР 40. Обробку катоду викону-

вати спільно з базової поверхнею точінням до необхідного розміру – діаметр 64,2 мм та висота 25,1 мм.

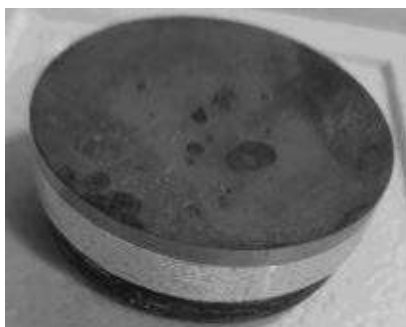


Рис. 1 – Загальний вигляд катоду для наплення

Кінцева обробка катоду виконувалась шліфуванням на круглошліфувальному верстаті. Загальний вигляд катоду після обробки представлено на рис. 1.

Експлуатація спеціального катоду показала працездатність даної конструкції при напленні надтвердих керамічних матеріалів. Однак, тривала експлуатація показала невеликі недоліки конструкції, які по'язані з кріпленням

мішені до опори катоду. Вияснилося, що пайка мішені до мідної опори припоем із срібла ПСР 40, при тривалому нагріві, приводить до відшаровування мішені від опори і неможливості подальшої експлуатації. Для рішення цієї проблеми прийнято рішення здійснити пайку мішені до мідної опори іншим припоем на основі срібла з великим складом (ПСр 72) у вакуумі.

Сахнюк І.О., Битков М.Х., Кириленко Л.В., Федосєєва І.К., Тітова Г.М. Технічний центр НАН України, Київ

ПРОПОЗИЦІЇ ДО ВИРІШУВАННЯ ПЕВНИХ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

На тлі наполегливого прагнення України вступу до Європейського Союзу до 2027 року в державі планується завершити ключові реформи. Україна ставить за мету стати членом ЄС до завершення поточного бюджетного циклу ЄС, що підтримується керівництвом держави. Європейська рада підтверджує, що майбутнє України – в ЄС, відзначаючи прогрес, проте, вступ у 2027 році вважається багатьма складним завданням.

За офіційними даними ЄС Україна отримала статус кандидата в червні 2022 року, переговори були формально відкриті 25 червня 2024 року, а двосторонній скринінг завершено у вересні 2025 року. 17 березня 2026 року Київ отримав фінальні умови ще за трьома кластерами, тобто має повний пакет вимог для роботи по всіх шести блоках переговорів. Основні аспекти євроінтеграції України стосуються прогресу реформ і швидкого відкриття таких переговорних кластерів: 1 «Основи процесу вступу до ЄС», 2 «Внутрішній ринок», 3 «Конкурентоспроможність та інклюзивний розвиток», 4 «Зелений порядок денний та сталі з'єднання», 5 «Ресурси, сільське господарство та політика згуртованості», 6 «Зовнішні відносини».

Саме ці блоки Єврокомісія вважає такими, за якими Україна виконала умови для відкриття переговорів. Україна активно працює над адаптацією власного законодавства до норм ЄС, зокрема завершивши скринінг кластера «Основи процесу вступу» (Fundamentals First). Цей кластер є ключовим блоком переговорів про членство України в ЄС, що охоплює фундаментальні реформи: верховенство права, правосуддя, боротьбу з корупцією, функціонування демократичних інституцій та державне управління. Він відкривається першим і закривається останнім, визначаючи темп усіх переговорів.

Згідно з наведеними вище прагненнями України до євроінтеграції перспективи функціонування стандартизації, сертифікації, технологічного управління якістю, метрології, технічного контролю та діагностики, зокрема в машино- і приладобудуванні, цілком мають відповідати європейським вимогам із цих питань.

На тлі провадження реформ у березні 2026 року в Торгово-промисловій палаті (ТПП) України відбулася робоча зустріч членів комітету підприємців при ТПП України з представниками Міністерства економіки, доквілля та сільського господарства України та ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». Основною темою обговорення стало питання про порядок скасування, розроблення, перегляду та застосування національних стандартів, зокрема щодо призупинення практики скасування національних стандартів до завершення воєнного стану в Україні. Основні теми обговорення:

- гармонізація національних стандартів з європейськими як стратегічний
- пріоритет, однак з урахуванням реальних умов функціонування бізнесу в умовах війни;

- призупинення практики скасування національних стандартів на період воєнного стану як тимчасовий антикризовий захід для підтримки економіки, збереження виробничого потенціалу та забезпечення стабільності внутрішнього ринку;
- установлення перехідного періоду строком не менше 2 років із дати втрати чинності стандартом, а також розробка механізму тимчасового продовження або відновлення дії національних стандартів;
- поширення практики перенесення строків скасування національних стандартів, які є важливою складовою критичної інфраструктури;
- ініціювання офіційного звернення Кабінету Міністрів України до Європейської Комісії щодо включення реформи сфери стандартизації до фінансування в межах інструменту Ukraine Facility (2024–2027);
- надання текстів національних стандартів (ДСТУ) у відкритому доступі в електронному форматі для ознайомлення зі збереженням платного доступу до отримання офіційної автентичної версії документа;
- усунення надмірного регуляторного навантаження та забезпечення ефективного функціонування технічних комітетів стандартизації, зокрема внесення змін до ДСТУ 1.14:2024.

Отже, поглиблювати співпрацю між бізнесом (розробниками), органами влади та національними органами стандартизації важливо для забезпечення конкурентоспроможності української продукції на внутрішньому та зовнішніх ринках. Також важливо знаходити окремі джерела фінансування для гармонізації стандартів відповідно до гармонізації законодавства з ЄС та вирішення актуальних проблем національної стандартизації.

Під час планування робіт зі стандартизації доцільно брати до уваги ключові пріоритети і дії, які формуватимуть європейську стандартизацію впродовж 2026 року, що стане визначальним для європейської стандартизації. На тлі стрімких технологічних, промислових і глобальних змін європейські організації стандартизації CEN і CENELEC залишаються послідовними у своїй місії — зміцнювати Єдиний ринок Європи, роблячи його більш цифровим і сталим завдяки стандартам. Цього року особливу увагу буде приділено технологіям, які визначатимуть майбутнє, зокрема штучному інтелекту, кібербезпеці та цифровому паспорту продукту. Стандарти, що розроблятимуться в цих сферах, мають надати Європі інструменти для безпечного, відповідального та впевненого лідерства в цифровій трансформації. Разом із Європейською

комісією та зацікавленими сторонами триває глибокий аналіз того, як зробити Європейську систему стандартизації більш ефективною, відкритою та готовою до майбутніх викликів. CEN і CENELEC також планують і надалі глибше інтегрувати стандартизацію в європейську екосистему досліджень та інновацій. У співпраці з академічними колами, науково-дослідними установами та інноваційними мережами визначатимуться нові й перспективні напрями для стандартизації, а також формуватиметься внесок у майбутню дослідницьку рамкову програму ЄС.

*Смоквина В.В., Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д.,
Зайцева І.М., Шейко М.М., Тимошенко В.В.* Інститут
надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
Дюк В.Є. Київський національний університет
імені Тараса Шевченка, Київ

ВПЛИВ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СИНТЕТИЧНИХ АЛМАЗІВ МАРКИ АС80 ЗЕРНИСТОСТІ 315/250 НА ЇХ ОДНОРІДНІСТЬ ЗА ЛІНІЙНИМИ РОЗМІРАМИ ТА МІЦНІСТЮ

Нині в машинобудуванні широко застосовуються правлячі ролики, оснащені шліфпорошками синтетичного алмазу. Працездатність правлячого інструменту багато в чому залежить від якості алмазів, що застосовуються. Розширення сфер застосування нових видів правлячого інструменту призвело до використання високоміцних синтетичних алмазів. На ефективність роботи прецизійного правлячого інструменту в значній мірі впливають фізико-механічні, фізико-хімічні властивості і розмірні характеристики шліфпорошків синтетичного алмазу, що застосовуються при оснащенні правлячих роликів.

У процесі роботи правлячого інструменту основним видом зносу синтетичних алмазів є крихке руйнування окремих частин алмазного зерна, що виступають, внаслідок розвитку мікротріщин у ньому при контакті з поверхнею оброблюваної деталі. При роботі інструменту осьове навантаження розподіляється неоднаково по всій площі поверхні алмазного інструменту, а перерозподіляється між алмазами, що найбільше виступають з поверхні. Враховуючи,

що характер розподілу висоти виступу алмазів з інструмента відповідає характеру розподілу осьових зусиль, що передаються на алмаз у процесі роботи правлячого інструменту, алмази з найбільшими висотами виступу навантажуються вдесятеро більше і миттєво руйнуються. Зменшити зусилля на алмаз можна при забезпеченні рівних висот їх виступу в інструменті за рахунок застосування алмазів, з високим вмістом основної фракції у складі порошку та однорідних за розміром та міцністю.

Дослідження проводили на шліфпорошках алмазу марки АС80 зернистості 315/250. Згідно принципової схеми розробленої в Інституті надтвердих матеріалів, спочатку порошки алмази окремих зернистостей піддавали вибірковому дробленню для усунення двійників, друз, слабких дефектних зерен. Для цього проводили дроблення в планетарному млині. При такому подрібненні частинки матеріалу руйнуються під дією зовнішніх сил. Руйнування алмазних частинок відбувається переважно за ослабленими перерізами, що мають тріщинуватості або інші дефекти структури. У планетарних млинах відзначається вибіркковість дроблення різномісних зерен алмазу при їх самоподрібненні. Для підвищення однорідності за лінійними розмірами зерна алмазу додатково розділяли на ситах R-20 з виділенням вузьких зернистостей 315/300.

В шліфпорошках алмазу вихідних та вузької зернистості проводили досліджування поверхневих характеристик класичним методом адсорбції газів при низьких температурах відповідно до методу БЕТ за допомогою газоадсорбційного аналізатора NOVA 2200 (Quantachrome, USA) і Accusorb 2100 (Культронікс), які призначені для вимірювання пористості, повної питомої площі поверхні, радіусу пор та ін.

Для кожної окремої марки алмазів оцінювали зерновий склад – вміст основної фракції (ОФ), коефіцієнт форми (K_f), визначали фізико-механічні характеристики за методиками розробленими в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України: міцність, як показник міцності при статичному стисненні (P , Н), однорідність за лінійними розмірами ($K_{\text{одн.л.-р.}}$, %) та міцністю ($K_{\text{одн.міц.}}$, %); за методом Фарадея оцінювали питому магнітну сприйнятливості χ ($\text{м}^3/\text{кг}$); за величиною вільної енергії насичення водою 1 г порошку оцінювали гідрофільність (ΔC_s , Дж/моль). Результати фізико-хімічних характеристик наведено у табл. 1.

Встановлено, що завдяки руйнуванню слабких, дефектних зерен та додаткового розподілу на ситах R-20, отримано шліфпорошки вузьких зернистостей з питомої поверхнею меншу за вихідні порошки

315/300 зростає на 18%, об'єм пор зменшився на 15%, середній радіус пор на 10% гідрофільність цих порошків зменшилась на 3,5%.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні характеристики шліфпорошків синтетичного алмазу вихідних та вузьких зернистостей марок АС80

Зернистість, мкм	Найменування показників			
	Питома площа поверхні, $S_{\text{ВЕТ}}, \text{ м}^2/\text{г}$	Об'єм пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Середній радіус пор, $R, \text{ нм}$	Гідрофільність, $\Delta C_s, \text{ Дж/моль}$
315/250 (вих.)	0,259	$3,02 \cdot 10^{-4}$	27,6	0,2349
315/300	0,211	$3,57 \cdot 10^{-4}$	24,8	0,2265

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики шліфпорошків алмазу вихідних та вузьких зернистостей марок АС80

Зернистість	Найменування показників				
	ОФ, %	$K_{\text{одн.л.р.}}, \%$	$K_f, \text{ ум.од.}$	$P, \text{ Н}$	$K_{\text{одн.міц.}}, \%$
315/250 (вих.)	71,1	28	1,57	98,7	26
315/300	80,5	56	1,24	118,1	52

Як впливає з табл. 2, після фізико-механічної обробки та додаткового розподілу на ситах R-20 зросли фізико-механічні характеристики: вміст основної фракції на 11,5%, коефіцієнт форми приблизно на 21%, що сприяло збільшенню коефіцієнтів однорідності за лінійними розмірами міцністю у 2 рази.

Тимофєєва Л.А. Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Сучасні газові мережі функціонують в умовах підвищених вимог до безпеки, точності комерційного обліку, мінімізації втрат і своєчасного реагування на аварійні або несанкціоновані відхилення від нормального режиму роботи. За таких умов вимірювання витрати, тиску, температури та облік втрат природного газу перетворюються на один

із ключових елементів технологічної та управлінської стабільності системи газопостачання. Саме тому газові мережі доцільно розглядати як складний об'єкт вимірювального та метрологічного контролю, у межах якого методи, засоби та організаційно-методичні підходи до вимірювання параметрів природного газу, обліку його витрати та втрат визначають рівень точності обліку, достовірності контролю параметрів, а також енергоефективності й надійності функціонування всієї системи. У такому контексті особливого значення набувають аналіз чинних методів вимірювання, удосконалення методики вимірювання й обліку втрат природного газу, а також оцінювання технічної й економічної доцільності впровадження сучасних рішень.

Принципово важливим є те, що проблема вимірювань у газових мережах має розглядатися не лише як питання точності окремих приладів, а як питання функціонування всієї інформаційно-вимірювальної інфраструктури. На достовірність результатів суттєво впливають температурні коливання, зміни тиску, зношування приладів, умови експлуатації та недоліки систем передачі даних. Крім того, особливої уваги потребує аналіз втрат газу – як технологічних, так і нетехнологічних, – а також проблема їх маскування сумарною похибкою вимірювальної системи. За умов децентралізованого обліку аналіз втрат часто здійснюється із затримкою, що знижує оперативність реагування, ускладнює контроль балансу та підвищує ризик накопичення значних втрат. Саме тому більш обґрунтованим є перехід до автоматизованих систем збору, передачі та обробки даних, які забезпечують не лише підвищення точності вимірювань, а й формування цілісного інформаційного середовища для балансування газу в режимі реального часу. Такий підхід фактично означає інтелектуалізацію вимірювального контролю та підвищення керованості газорозподільної системи.

Удосконалена система вимірювання та обліку втрат природного газу здатна забезпечити не лише технічний, а й відчутний економічний ефект. Витрати на модернізацію таких систем пов'язані із закупівлею засобів вимірювання, виконанням монтажу та налагодження, впровадженням програмного забезпечення, організацією метрологічного супроводу та підготовкою персоналу. Водночас джерелами ефекту виступають зменшення похибок обліку, скорочення аварійності, автоматизація контрольних операцій, підвищення оперативності обробки даних і своєчасне виявлення аномалій у роботі мережі. У підсумку вимірювальний контроль у газових мережах доцільно пов'язувати не лише з використанням точніших

датчиків, а насамперед із переходом до інтегрованих автоматизованих систем, здатних підтримувати баланс, виявляти відхилення та мінімізувати втрати на основі безперервного аналітичного спостереження. Саме така логіка забезпечує підвищення надійності, безпеки та ефективності функціонування сучасних систем газопостачання.

Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.
2. Закон України «Про ринок природного газу» від 09.04.2015 № 329-VIII.
3. Кодекс газорозподільних систем : затв. постановою НКРЕКП від 30.09.2015 № 2494.
4. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.
5. ДСТУ EN 1776:2017. Системи газопостачання. Газовимірювальні станції. Функціональні вимоги.
6. ДСТУ EN 12480:2016. Лічильники газу. Роторні лічильники газу.
7. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII.

Тимофєєва Л.А., Сайчук К.О. Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ІНТЕГРАЛЬНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МЕТРОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЕРТНИХ ПОСЛУГ

У сфері технічних, метрологічних і експертних послуг якість не може визначатися лише своєчасністю виконання роботи або формальною відповідністю документації встановленим вимогам. Вона має розглядатися як багатокомпонентна характеристика, у якій поєднуються технічна точність, організаційна впорядкованість, результативність взаємодії із замовником, компетентність персоналу, надійність процедур і здатність підприємства забезпечувати стабільно відтворюваний результат. За таких умов оцінювання якості має ґрунтуватися не на поодиноких і розрізнених показниках, а на цілісній системі, здатній відображати реальний стан

процесів, виявляти критичні зони, фіксувати чинники впливу та формувати основу для послідовного вдосконалення діяльності.

Сучасна практика оцінювання якості послуг нерідко залишається недостатньо формалізованою, слабо інтегрованою з процесами управління якістю та не завжди придатною для об'єктивного порівняння результатів у динаміці. У багатьох випадках вона зводиться до окремих контрольних процедур, які не дають повного уявлення про фактичний рівень якості, не враховують сукупний вплив організаційних, кадрових, технічних і сервісних чинників, а також не забезпечують належного зв'язку між результатами оцінювання та подальшими управлінськими рішеннями. Саме тому більш обґрунтованим є підхід, заснований на системному, процесному та ризик-орієнтованому баченні, за якого якість розглядається як інтегральний результат функціонування підприємства, а не як проста сума окремих формально виконаних вимог.

За такого підходу оцінювання якості набуває чіткої структури та спирається на взаємопов'язану систему критеріїв і показників, які дають змогу переходити від описового контролю до кількісного аналізу. Інтегральне оцінювання створює можливість не лише фіксувати поточний стан, а й аналізувати тенденції, виявляти системні недоліки, зіставляти результати різних періодів і формувати обґрунтовану основу для управлінських рішень. Особливо важливо, що така модель ураховує не лише технічні параметри якості, а й рівень організації процесів, стан документаційного забезпечення, узгодженість внутрішніх процедур, компетентність виконавців та якість комунікації із замовниками.

Якість послуг у технічній і метрологічній сфері доцільно розглядати як інтегральну характеристику результативності діяльності підприємства, сформовану під впливом технічних, організаційних, кадрових, документаційних і сервісних чинників. У такому розумінні оцінювання якості перестає бути формальною процедурою звітування і перетворюється на складову стратегічного управління. Воно безпосередньо пов'язується з удосконаленням внутрішніх процесів, підвищенням узгодженості системи менеджменту якості, розвитком механізмів внутрішнього контролю, зростанням задоволеності замовників і зміцненням конкурентних позицій підприємства. Саме така логіка дає підстави розглядати систему оцінювання якості не як допоміжний інструмент, а як один із центральних механізмів підвищення результативності та стійкості діяльності підприємства технічного профілю.

Література

1. ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги.
2. ISO 9004:2018. Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху.
3. ISO 19011:2018. Настанови щодо аудиту систем управління.
4. ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
5. ISO 31000:2018. Управління ризиками. Принципи та настанови.
6. Закон України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 №1315-VII.
7. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015 № 124-VIII.

Тимофєєва Л.А., Устименко О.Г. Український державний університет залізничного транспорту, Харків

КОМПЛЕКСНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ

Проблема достовірного визначення теплових втрат у системах централізованого тепlopостачання має не лише економічне, а й технічне, екологічне та управлінське значення. Теплова мережа є складним об'єктом вимірювання, оскільки на її стан і параметри впливають просторова протяжність, неоднорідність режимів роботи, стан теплоізоляції, тип прокладання трубопроводів, зовнішні кліматичні умови та наявність локальних дефектів. Саме тому теплові мережі доцільно розглядати як об'єкт теплотехнічних і метрологічних вимірювань, а методи, засоби та організаційно-методичні підходи до визначення теплотехнічних параметрів і теплових втрат — як ключову складову підвищення точності контролю параметрів теплоносія та енергоефективності систем тепlopостачання. У такому контексті особливого значення набуває аналіз існуючих методів вимірювання температури, тиску, витрати теплоносія та теплових втрат, а також пошук більш досконалих підходів до інструментального контролю стану теплових мереж.

Особливо важливим є підхід, за якого теплова мережа розглядається як об'єкт із просторово-часовою нерівномірністю те-

плових процесів. Температурне поле вздовж трубопроводу є неоднорідним і залежить від багатьох чинників, а отже використання лише точкових вимірювань не дає достатньо повної картини для достовірного оцінювання стану мережі. Саме це підводить до необхідності переходу від традиційних підходів до комплексного вимірювального моніторингу, заснованого на поєднанні контактних і безконтактних засобів вимірювання, автоматизованому зборі та обробці даних і вищому рівні просторової деталізації. У порівняльному аспекті такий підхід характеризується кращою відтворюваністю, інформативністю і просторовою деталізацією порівняно з нормативним і балансним методами, а його застосування створює можливість ідентифікації найбільш проблемних ділянок мережі та адресного планування ремонтно-модернізаційних заходів. Завдяки цьому вимірювальний контроль теплових мереж набуває не лише фіксувального, а й аналітичного значення.

Застосування таких рішень дає змогу перейти від описового контролю параметрів теплової мережі до інструментального виявлення джерел енергетичних втрат. Це створює передумови для більш обґрунтованого планування ремонтів, оптимізації режимів роботи, зменшення непродуктивних витрат теплової енергії та посилення керованості систем тепlopостачання. Не менш важливо, що при організації вимірювальних робіт у теплових мережах необхідно враховувати і питання безпеки, оскільки надійність контролю безпосередньо пов'язана з умовами його виконання. У підсумку вимірювальне забезпечення теплових мереж доцільно розглядати як інтегровану систему, у якій метрологічна точність, автоматизація, енергоефективність і безпечна експлуатація виступають не ізольованими аспектами, а взаємопов'язаними складовими підвищення ефективності галузі тепlopостачання.

Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.
2. Закон України «Про тепlopостачання» від 02.06.2005 № 2633-IV.
3. Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX.
4. ДСТУ EN 1434-1:2019. Лічильники теплової енергії. Частина 1. Загальні вимоги.

5. ДСТУ EN 1434-6:2019. Лічильники теплової енергії. Частина 6. Установлення, введення в експлуатацію та технічне обслуговування.

6. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання.

7. Li H., [et al.]. Heat loss analysis of district heating pipelines // Energy and Buildings. 2019. Vol. 198. P. 144–153.

Тимофєєва Л.А., Шупіло Р.Г. Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ В СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

Якість метрологічних робіт у сучасному виробництві слід розглядати не як вузькоспеціалізовану функцію окремої служби, а як один із базових механізмів забезпечення стабільності виробничих процесів, відповідності продукції нормативним вимогам і достовірності управлінських рішень. У виробничому середовищі, де точність вимірювань безпосередньо впливає на якість продукції, рівень браку, витрати ресурсів і загальну технологічну дисципліну, метрологічне забезпечення виконує роль ключового елемента системи управління якістю. Воно формує інформаційну основу для контролю параметрів, оцінювання стану процесів і прийняття обґрунтованих рішень на всіх етапах виробничого циклу.

Система управління якістю метрологічних робіт має системний характер і поєднує технічні, організаційні, методичні та документальні складові. Її ефективність визначається не лише технічним станом засобів вимірювальної техніки, а й рівнем організації метрологічного контролю, узгодженістю процедур повірки й калібрування, якістю документального супроводу, чіткістю розподілу відповідальності між підрозділами та здатністю системи своєчасно виявляти й усувати похибки. У цьому контексті метрологічна діяльність виходить за межі простої сукупності перевірок і калібрувальних операцій та постає як багаторівнева система, у якій

точність вимірювань, контроль невизначеності, простежуваність результатів і нормативна відповідність взаємопов'язані між собою.

Визначальне значення має не лише технічна оснащеність, а й належна організація обігу вимірювальної інформації. Збір, обробка, зберігання та використання результатів вимірювань повинні бути інтегровані в загальну систему управління підприємством. Будь-які організаційні недоліки, неузгодженість у процедурах, помилки в документуванні або несвоєчасне реагування на відхилення здатні істотно знизити результативність метрологічного забезпечення, навіть за наявності сучасних засобів вимірювання. Саме тому ефективне функціонування системи залежить від узгодженої дії технічного, методичного та управлінського компонентів, кожен із яких є необхідною умовою достовірності результатів і стабільності виробничих процесів.

Значущість такого підходу полягає в тому, що він дозволяє зменшити ризики недостовірних вимірювань, підвищити стабільність технологічних режимів, запобігати браку, знижувати непродуктивні витрати та забезпечувати відповідність продукції встановленим вимогам. Метрологічне забезпечення не може ефективно функціонувати ізольовано від системи менеджменту якості, оскільки саме в її межах воно набуває управлінської завершеності й стає джерелом достовірної, своєчасної та відтворюваної інформації для прийняття рішень. У такому розумінні управління якістю метрологічних робіт є не допоміжною функцією, а важливою складовою загальної архітектури сучасного виробничого підприємства.

Література

1. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015 № 124-VIII.
2. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.
3. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
4. Закон України «Про захист прав споживачів» від 12.05.1991 № 1023-XII.
5. Державні санітарні норми, правила і гігієнічні регламенти, затверджені МОЗ України.
6. Методичні рекомендації, інструкції та нормативи МОЗ України, Мінекономіки України та Національного агентства з акредитації України.

ВІБРАЦІЇ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВУ NiTi

Мініатюризація сучасних виробів зумовлює підвищення вимог до точності формоутворення, стабільності технологічних процесів та якості оброблених поверхонь. Одним із найбільш ефективних методів виготовлення мікрогеометричних елементів є мікрофрезерування, яке забезпечує високу точність обробки та можливість формування складних мікропрофілів у широкому спектрі конструкційних матеріалів [1].

Сплав нікеліду титану (NiTi) належить до матеріалів з ефектом пам'яті форми. Завдяки високій корозійній стійкості, біосумісності та пружності цей матеріал широко використовується у виробництві медичних пристроїв, які містять мікроелементи, що підлягають обробці мікрофрезеруванням [2].

При мікрофрезеруванні суттєво змінюються умови формування стружки та динамічна поведінка технологічної системи. Зменшення діаметра інструмента до значень менше 1 мм призводить до різкого зниження його згинальної жорсткості, що підвищує чутливість системи «верстат – інструмент – заготовка» до динамічних збурень. У результаті навіть незначні зміни режимів різання можуть спричинити розвиток коливальних процесів. Віб्राції в зоні різання безпосередньо впливають на точність формоутворення мікроелементів, шорсткість поверхні та інтенсивність зносу інструмента.

Ще однією причиною виникнення вібрацій є прояв масштабного ефекту. Коли товщина зрізаного шару стає співрозмірною з радіусом заокруглення різальної кромки, процес різання супроводжується зростанням частки пружно-пластичної деформації матеріалу. Це призводить до підвищення сил різання, збільшення інтенсивності тертя та нестабільності процесу стружкоутворення [3].

Одним із проявів динамічної нестабільності є виникнення автоколивань, які формуються внаслідок взаємодії між інструментом, заготовкою та елементами технологічної системи. Відомо, що власні частоти мікрофрез можуть знаходитися у діапазоні кількох кілогерц і частково збігатися з частотами збудження, пов'язаними з обертанням шпинделя та проходженням зубців інструмента через зону різання. За таких умов формується регенеративний механізм

автоколивань, що призводить до різкого збільшення амплітуди вібрацій та погіршення якості обробки [4].

Для дослідження вібраційних явищ у процесах різання застосовуються різні методи вібродіагностики. Аналіз сигналів вібраційного прискорення дозволяє оцінити інтенсивність коливань технологічної системи та встановити їх зв'язок з умовами різання.

З метою дослідження вібрацій при мікрофрезеруванні сплаву NiTi виконано експериментальні дослідження процесу обробки мікропазів. Досліджувався вплив параметрів режиму різання на рівень вібрацій у технологічній системі.

Дослідження проводилися на вертикально-фрезерному верстаті HAAS VF-2SSYT-NG. Обробка пазів проводилася кінцевими твердосплавними мікрофрезами GARANT Master Titan з покриттям TiAlN діаметром 1,0 мм. Дослідження проводилися для наступних режимів різання: глибина різання 0,03 та 0,1 мм, подача на зуб 0,001, 0,002, та 0,003 мм/зуб, швидкість різання 10, 14, 18 м/хв. Реєстрація сигналів здійснювалась за допомогою вібродатчика з подальшим аналізом часових реалізацій сигналу та визначенням середньоквадратичного значення вібраційного прискорення (RMS) [5].

На основі дисперсійного аналізу експериментальних даних було побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів, яка описує залежність RMS вібраційного прискорення від параметрів режиму різання:

$$\text{RMS} = -0,010432937 + 0,027301587_3t - 5,383333_3S_2 + 0,005287_5V + \\ + 118,5714285_7S_2 \cdot t + 0,02154761_9V \cdot t - 0,2812_5V \cdot S_2.$$

Значення коефіцієнта детермінації R^2 для апроксимаційної регресійної моделі становило 0,8, що свідчить про її статистичну прийнятність та адекватність опису експериментальних даних. Отримані результати дозволили встановити закономірності зміни рівня вібрацій при різних умовах мікрофрезерування та визначити, що швидкість різання найбільш суттєво впливає на динамічну стабільність процесу. Це створює передумови для обґрунтування раціональних режимів мікрофрезерування сплаву NiTi.

Література

1. Томашевський О. О., Балицька Н. О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд // Технічна інженерія. – 2023. – № 2(92). – С. 74–88.
2. Velmurugan C., [et al.]. Machining of NiTi shape memory alloys – A review // Machining Science and Technology. – 2017. – Vol. 22, no. 3. – P. 355–401.

3. Aramcharoen A., Mativenga P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel // Precision Engineering. – 2009. – Vol. 33. – P. 402–407.

4. Jin X., Altintas Y. Chatter stability model of micro-milling with process damping // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 135, no. 3. – 031011.

5. Томашевський О. О. Експериментальна оцінка вібрацій у процесі мікрофрезерування титанового сплаву // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2026. – Т. 363, № 2. – С. 28–40.

Хитров І.О. Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧИХ І РЕМОНТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

Транспортна галузь є однією з ключових складових економіки, від ефективності якої залежить розвиток міст, логістики та промисловості в цілому. Сучасні вимоги до швидкості, безпеки та надійності транспортних засобів зумовлюють необхідність постійного вдосконалення виробничих і ремонтних процесів [1].

Однією з ключових тенденцій є цифровізація виробничих процесів, яка передбачає використання автоматизованих систем управління, технологій штучного інтелекту та інтернету речей. Це дозволяє забезпечити підвищення точності виготовлення транспортних засобів, зниження виробничих витрат та оптимізацію логістичних процесів [2, 3].

Важливим напрямом розвитку є впровадження концепції прогностичного технічного обслуговування, що базується на аналізі даних з датчиків і систем діагностування. Такий підхід дає змогу своєчасно виявляти потенційні відмови, зменшувати простой транспортних засобів і підвищувати рівень їх надійності [4-5].

Суттєвих змін зазнають і ремонтні технології, зокрема завдяки використанню адитивних технологій (3D-друку), які дозволяють виготовляти запасні частини безпосередньо на місці експлуатації. Це скорочує терміни ремонту та зменшує залежність від централізованих складів [6, 7].

Ще однією тенденцією є інтеграція інформаційних систем управління життєвим циклом транспортних засобів, що забезпечує узгодженість процесів проектування, виробництва, експлуатації та ремонту [8]. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності управління ресурсами та якості обслуговування.

У контексті екологічних викликів особливого значення набуває впровадження ресурсозберігаючих і енергоефективних технологій, що дозволяють зменшити негативний вплив транспорту на навколишнє середовище [9, 10].

Крім того, спостерігається тенденція до модульності конструкцій транспортних засобів, що значно спрощує процеси ремонту та технічного обслуговування, знижуючи їх трудомісткість і вартість. Крім того, використання стандартизованих модулів полегшує впровадження нових технологій та модернізацію транспортних засобів, підвищуючи їхню адаптивність до швидко змінюваних вимог ринку та умов експлуатації. У перспективі модульні конструкції створюють основу для розвитку інтелектуальних та автономних транспортних систем, де взаємозамінність і стандартизація компонентів є критичними для надійності та безпеки експлуатації

Таким чином, сучасні тенденції розвитку виробничих і ремонтних процесів у транспортній галузі спрямовані на підвищення ефективності, надійності та екологічності транспортних систем. Ключову роль у цьому відіграють цифрові технології, інноваційні методи діагностування та новітні підходи до організації технічного обслуговування і ремонту. Подальший розвиток галузі пов'язаний із інтеграцією інтелектуальних систем управління та широким впровадженням автоматизації.

Література

1. Хітров І.О. Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування // Центральнотрапекранський науковий вісник. Технічні науки. – 2023. – Вип. 8(39), ч.ІІ. – С. 214–222.

2. Бабін Д.О., Марценюк Л.В. Сучасні цифрові послуги на транспорті // Управління проектами. Перспективи розвитку проектного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності, трансфер технологій : зб. наук. пр. VII Міжнар. наук.-пркт. інтернет-конф. (27–28 берез. 2025 р.). – Дніпро, 2025. – С. 503–507.

3. Каличева Н.С., Масан В.В., Тупікіна К.О. Цифровізація у сфері транспорту: переваги та виклики // Стратегічні імперативи сучасного менеджменту : зб. матеріалів VI Міжнар. наук.-практ. конф. (21 жовт. 2022 р.). – Київ : КНЕУ, 2022. – С. 292–294.

4. Yashashree Mahale, Shrikrishna Kolhar, Anjali S. More. Enhancing predictive maintenance in automotive industry: addressing class imbalance using advanced machine learning techniques // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7(340). –

5. Predictive Maintenance in Modern Cars Using Onboard Diagnostic and AI Models. Pedal Commander.

6. Izgin G. Implementation of Additive Manufacturing Technology. – 2024. – 37 p.

7. Wilson S., Thomas R., Mary N., Bosco E.T., Gopinath A. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – 1132.

8. Кашканов В.А., Кашканов А.А., Кужель В.П. Інформаційні системи і технології на автомобільному транспорті : навч. посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 104 с.

9. Хітров І.О., Гавриш В.С., Корнієнко В.Я. Ресурсо- та енергозбереження : навч. посібник. – Рівне : НУВГП, 2014. – 108 с.

10. Хітров І.О., Кононогов Ю.А. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Т. 35(74). – С. 191–196.

*Цисар М.О., Псярнецька Т.О., Девін Л.М.,
Ричев С.В., Льницька Г.Д., Зайцева І.М.* Інститут
надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ, ЩО ВИНИКАЄ ПРИ ОБЧИСЛЕННІ ХАРАКТЕРИСТИК МІЩНОСТІ ВИСОКОМІЩНИХ ТЕРМОСТІЙКИХ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ ТИПУ ІЬ

При отриманні будь-яких експериментальних даних дуже важливими є відтворюваність експерименту, та похибка невизначеності вимірюваної величини згідно ISO 9001. Для цього потрібно розуміти за рахунок, чого здійснюється такий контроль. Вимірювальний

контроль – перевірка відповідності об'єктів дослідження нормативній документації. Метрологічними показниками є ціна поділок, діапазон вимірювання, межа допустимої похибки вимірювань, допустима похибка засобів вимірювальної техніки та межа вимірювань. Вимірювання за способом отримання результатів можна розділити на прямі, непрямі, абсолютні та відносні.

Прямі, це такі, де досліджувана величина отримується безпосередньо з експерименту. В нашому випадку прямим методом можна вимірювати лише лінійні розміри кристалу: довжина ребра, загальна висота. Для цього можна використовувати цифровий штангенциркуль з точністю $\pm 0,01\text{мм}$, або мікрометр часового типу $\pm 0,005\text{мм}$. Яка в цьому випадку буде похибка, що відповідає вимірюваній довжині ребра 1000 мкм .

Відносну похибку визначають за співвідношенням абсолютної похибки до істинного значення величини відтворюваної міри [1]:

$$\delta = \Delta x/x \cdot 100\%.$$

Так для випадку штангенциркуля, величина δ буде складати 1% , а для мікрометра $0,5\%$ відповідно, що відповідає вимогам ISO 9001 відносно точності вимірювальних приладів. Проте такі вимірювання треба проводити з використанням спеціальних тримачів та луп, людський фактор, якість опорної площадки буде сильно впливати на результати вимірювань.

Якщо ми будемо використовувати оптичний метод для вимірювання геометричних розмірів дослідного об'єкту з використанням цифрової камери, то це вже не буде прямим методом. Відносні методи, це такі, де досліджувана величина x визначається за допомогою технічних засобів, числове значення яких визначається згідно з співвідношенням її до величини X , яка приймається за одиницю вимірювання (масштаб m) [1]:

$$x = X \cdot m.$$

На точність визначення масштабу буде впливати контрольний зразок, зазвичай це мікрометр об'єкт на котрому написано ціну поділки $0,01\text{мм}$, фізичне збільшення об'єктиву можливо до 1024 крат, розмір матриці в мега пікселях: 5 Мп , 10 Мп , 20 Мп . В якості прикладу візьмемо випадок із стандартним мікрометр об'єктом ГОСТ 7513-75, максимальне збільшення, що може дати МБС10 це 100 крат, та 5 Мп камерою. Зображення лінійки мікрометр об'єкту наведено на рис. 1. Масштаб визначається для одного повного пікселя і є співвідношенням відстані між двома крайніми засічками,

що відповідає 1000 мкм на мікрометр об'єкті, з довжиною на зображенні в пікселях 577 пікселя, відповідно $m = 1,73$ мкм. Стандартне відхилення складає 1 піксель тобто $\Delta x = 1,73$ мкм. Відносна похибка для таких вимірювань складатиме 0,2%.

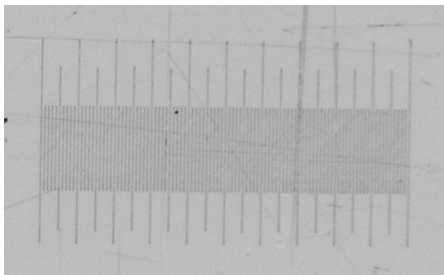


Рис. 1 – Мікрометр об'єкт з ціною поділки 0,01 мм

Таким чином оптичний метод є більш точним та не потребує додаткових пристосувань, крім того мінімізується вплив так званого людського фактору.

Однак зменшення похибки за рахунок використання оптичного методу не пояснює суттєву розбіжність експериментальних даних. В зв'язку з чим розглянемо сумарну похибку всієї вимірюваної системи. Сумарна похибка розраховується як алгебраїчна сума для систематичних похибок [2]:

$$\delta_{\text{загал}} = \sum \delta_i$$

Даний підхід можна використовувати коли похибки мають однакову розмірність: мм, кг, с, А тощо.

Метод квадратичного сумування найбільш розповсюджений для незалежних похибок [2]:

$$\delta_{\text{загал}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{\text{загал}_i}^2},$$

де $\delta_{\text{загал}_i}$ – окремі складові, що складають похибку похибка вимірювання відстані, лінійних розмірів, зусилля.

Виходячи з цих формул загальна похибка для прямого методу вимірювання лінійних розмірів без урахування людського фактору складатиме 3,5%, а для непрямого 1,8%. Не дивлячись на те що непрямий метод дає точність в два рази вищу, однак це не пояснює величину розкиду експериментальних даних отриманих класичними методами в порівнянні із методом розробленим дослідною групою ІНМ НАН України. Таким чином нам необхідно розглянути методичну похибку.

Похибка методу або методична похибка – це складова систематичної похибки вимірювань, що виникає через недосконалість прийнятого методу, спрощень у теоретичних формулах, використання неадекватних моделей або впливу засобів вимірювань на об'єкт. Вона характеризує помилку у способі отримання результату, а не в методах вимірювання. Розглянемо на конкретному прикладі для окремого монокристалу алмазу октаедричного габітусу (рис. 2).

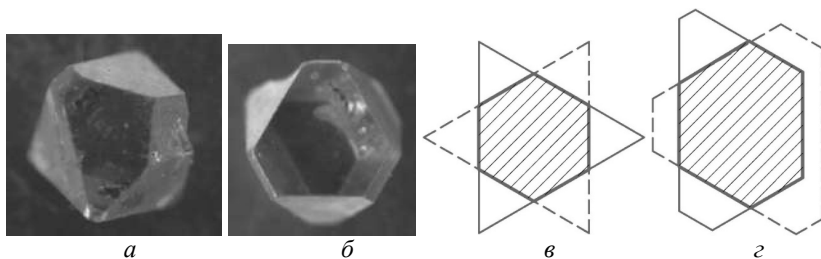


Рис. 2 – Зображення контактних площин кристалу типу Ib:

a – верхня опорна; *б* – нижня опорна; *в* – перекриття за рахунок спрощення; *г* – перекриття за реальною геометрією.

Провівши аналіз двох підходів [3] було виявлено, що зусилля в обох випадках визначається однаково, а от величина площі в знаменнику може мати суттєву розбіжність за рахунок приведення форми кристалу до ідеалізованої форми октаедру вписаного в неідеальний кристал. Розкид даних по співвідношення значення площі контактної площадки може варіюватись від 2 до 126%, в нашому випадку він складає 50,83%, ця величина в більшій мірі залежить від рівня притуплення вершин октаедра гранями куба, та інших викривлень форми. Таким чином ми практично показуємо недосконалість методу.

Література

1. Стухляк П.Д., Іванченко О.В., Букетов А.В., Долгов М.А. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація). – Херсон : Айлант, 2011. – 371 с.
2. Щепковський В.И. Визуально-оптический и измерительный контроль. – Запоріжжя : МоторСич, 2004. – 316 с.
3. Цисар М.О., Псярнетська Т.О., Грушко В.І., Виноградов С.О. Порівняння двох підходів контролю якості алмазів типу Ib октаедричного габітусу як ріжучих елементів геологорозвідувального інструменту // Комплексне забезпечення якості технологічних про-

цесів та систем (КЗЯТПС – 2025) : матеріали тез доповідей XV Міжнарод. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.) : у 2 т. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 2. – С. 167–169.

Шейкін С.Є., Студенець С.Ф., Дідковський Т.М.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України, Київ

ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВТУЛОК З КРУГЛИМ ТА ФАСОННИМ ОТВОРОМ ЗАСТОСУВАННЯМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Сьогодні для відновлення деталей широко використовується наплавлення їх зношених поверхонь з подальшою механічною обробкою. Цей підхід може забезпечувати необхідну точність, якість та повне відновлення функціональних властивостей зношених деталей різної форми, але потребує додаткових витрат матеріалів та значного енергоспоживання.

Поряд з цим відновлення розмірів деяких типів зношених та пошкоджених деталей можливо застосуванням холодного пластичного деформування (ХПД) без додаткових витрат матеріалів із значно меншими витратами енергії. Головними перевагами ХПД є висока продуктивність обробки, високий коефіцієнт використання металу, створення сприятливого поєднання механічних властивостей матеріалу виробів.

Для відновлення зношених деталей трубчастої форми, наприклад, поршневих пальців двигунів внутрішнього згорання, хрестовин карданних валів доцільно застосувати ХПД за технологічною схемою деформувального протягування (ДП). При ДП (рис. 1) через отвір у зношеній деталі типу втулки пропускають інструмент у вигляді усіченого конуса, діаметр якого більше діаметру отвору в деталі [1]. В результаті пластичної деформації відбувається перерозподіл матеріалу зношеної деталі по об'єму, утворюється припуск на механічну обробку робочих поверхонь.

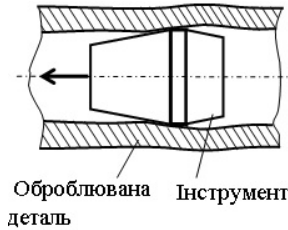


Рис. 1 – Технологічна схема деформувального протягування

Для відновлення деталей з отвором фасонного профілю (зубчасті муфти, колеса з внутрішнім зачепленням, шліцьові втулки кермових колонок, карданних валів автомобілів, сільськогосподарської техніки та залізничних потягів тощо) можливо застосування ХПД за технологічною схемою редукування на фасонній оправці.

Редукування – процес зворотній ДП. При редукуванні (рис. 2) відбувається вплив на зовнішню поверхню деталі та зменшення її зовнішнього діаметру з одночасним впливом профілю оправки на її внутрішню поверхню [2, 3].

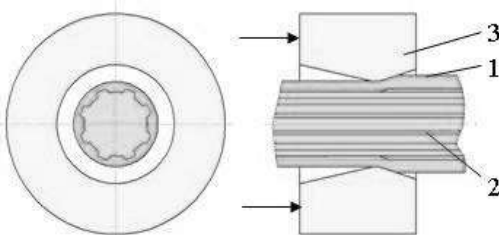


Рис. 2 – Схема редукування на фасонній оправці:

1 – оброблювана деталь; 2 – рухома оправка; 3 – деформуючий інструмент (волока)

Методи мають наступні переваги:

- для реалізації потрібен лише прямолінійний рух;
- висока стійкість і простота конструкції твердосплавних інструментів;
- при формоутворенні деталі відбувається деформаційне зміцнення матеріалу та підвищення її експлуатаційних характеристик;
- не вимагають високої кваліфікації оператора.

Розробка технологічного процесу відновлення поршневих пальців та хрестовин карданних валів передбачає вирішення наступних задач:

- розрахунок деформації необхідної для створення припуску під механічну обробку;
- вибір технологічних режимів за умови забезпечення припуску під механічну обробку зношених робочих поверхонь;
- розробка конструкції інструменту.

Перед ХПД оброблювані деталі мають бути піддані відпалу.

Перерозподіл матеріалу зношених поршневих пальців відбувається при ДП за схемою, наведеною на рис. 1. Технологічні

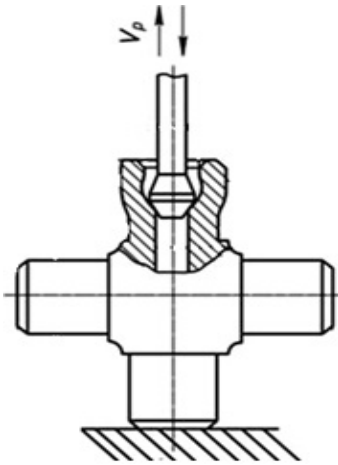


Рис. 3 – Схема роздачі зношеного шипа хрестовини

режими забезпечують утворення припуску під обробку по циліндричній поверхні при незмінній довжині. Схему роздачі зношеного шипа хрестовини наведено на рис. 3.

Геометрія інструменту забезпечує утворення припуску під обробку по циліндричній поверхні та торцю [4].

Після ХПД деталі піддають термічній й подальшій механічній обробкам.

При відновленні карданних валів дизель-потягів необхідно відновити зношені третьові поверхні рухомих елементів (рис. 4).

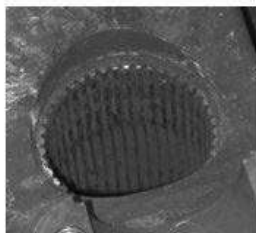
Відновлення працездатності шліцьового валу проводять зрізанням зношених шліців та подальшим нарізанням нового шліцьового профілю меншого діаметру з меншою кількістю зубців фрезеруванням інструментом відповідного профілю. Ця операція проблем не викликає.

Більш складним та трудомістким є відновлення вилки шляхом заміни зношеної шліцьової ділянки. Зношені шліці вилки зрізають, а на їхнє місце запресовують та закріплюють втулку з повноцінним внутрішнім шліцьовим профілем, який відповідає профілю валу [5].

Формування внутрішнього шліцьового профілю втулки проводиться ХПД за технологічною схемою редукування на фасонній оправці (рис. 2). Фото готових шліцьових втулок наведено на рис. 5. Запресовані у вилку втулки фіксують зварними штифтами.



a



б

Рис. 4 – Карданний вал дизель-потягу Д-1:
a – карданний вал в зборі; *б* – зношена ділянка вилки



Рис. 5 – Готові шліцьові втулки

Відновлені таким чином деталі за своїм ресурсом не поступаються новим.

Література

1. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – Киев : Наук. Думка, 1981. – 288 с.
2. Нахайчук О.В., Розенберг О.О., Огородников В.А., Крицкий А.Д., Мельниченко В.В., Студенець С.Ф. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 163 с.
3. Розенберг О.А., Шейкин С.Е., Делеви В.Г., Ткач В.Н., Герасимович А.В., Крицкий А.Д., Григорьев Н.М. Особенности формообразования продольных пазов на внутренней поверхности трубных заготовок холодным пластическим деформированием // Сверхтвердые материалы. – 1997. – № 1. – С. 30–37.
4. Кривошея В.В. Влияние угла рабочего конуса деформирующего элемента на процесс деформирующего протягивания цилиндрических отверстий. – Saarbrücken, Deutschland : LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 127 p.

5. Немировський Я.Б., Сторчак М.Г., Шейкін С.Є., Шепеленко І.В. (ред.) Відновлення деталей комбінованими технологіями на основі пластичного деформування : колективна монографія. – Харків : Діса плюс, 2025. – 673 с. – ISBN 978-617-8688-34-9.

Шепеленко І.В., Красота А.М., Красота М.В.
Центральноукраїнський національний
технічний університет, Кропивницький,
Немировський Я.Б. Державний університет
«Житомирська політехніка», Житомир
Посвятенко Н.І. Національний транспортний
університет, Київ

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ

Визначальним напрямком розвитку науково-технічного прогресу держави є створення, випуск та широке використання прогресивних матеріалів.

На жаль, металургійна галузь нашої країни, яка є стратегічним сектором економіки, перебуває у дуже складній ситуації. Динаміка виробництва чавуну та сталі в Україні за останні п'ять років свідчить про значне їх скорочення порівняно з довоєнним періодом (табл. 1).

Падіння виробничих потужностей та значне скорочення виготовлення чорних металів вплинули на можливості машинобудівної галузі. Традиційний дефіцит кольорових металів, промислові родовища яких у нашій країні практично відсутні, створює значні складності в Україні при виробництві таких антифрикційних матеріалів як мідь, латунь та бронза [2].

Таблиця 1 – Показники діяльності металургійних підприємств України по роках [1]

Виробництво, млн. т	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	2025 р.
Чавун	21,2	6,39	6,00	7,30	8,1
Сталь	21,4	6,26	2,23	7,58	7,6

Крім того, ливарне виробництво кольорових металів, зокрема бронзи, потребує значних витрат електроенергії, яка у сучасних умовах є дефіцитним та дорогим ресурсом.

Таким чином, в умовах традиційної обмеженості сировинної бази та енергетичної кризи виробництво антифрикційних матеріалів, з яких виготовляють підшипники ковзання, втулки, вкладиші та ін., в найближчій перспективі перебуває під загрозою.

Одним із підходів до вирішення цієї проблеми може бути нанесення антифрикційних покриттів на поверхні деталей із чорних металів. Використання сировини власного виробництва – чавунів та сталей, виробництво яких, незважаючи на значне скорочення, налагоджено в нашій країні (за підсумками 2025 р. Україна входить до двадцятки найбільших виробників сталі у світі) є альтернативою виготовленню деталей з кольорових сплавів. Така стратегія дозволить використати механічні властивості чавунної або сталеві основи, а за рахунок антифрикційних покриттів забезпечити покращення трибологічних характеристик поверхні тертя.

Розглядаючи різноманіття способів нанесення антифрикційних покриттів, слід зазначити, що кожна технологія має свої переваги та недоліки, а отже і галузь використання. Серед методів отримання мідьвмісних покриттів особливої уваги заслуговує фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО), сутність якої полягає у нанесенні тонкого шару міді, латуні та бронзи на поверхню деталей, внаслідок чого вони набувають високих антифрикційних властивостей [3].

На кафедрі експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету протягом багатьох років виконуються комплексні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності застосування ФАБО поверхонь тертя. Серед найбільш вагомих отриманих результатів слід відзначити наступні:

- розробка технології фінішної обробки гільз циліндрів ДВЗ, що поєднує операції розкочування гільзи та нанесення на її поверхню антифрикційного мідного покриття (автор І.М. Соколенко);
- використання вібрації інструменту при нанесенні антифрикційних покриттів на зовнішні циліндричні поверхні на прикладі цапф шестерень гідронасосів (автори: В.В. Черкун, І.В. Шепеленко);
- розробка комбінованої технології обробки гільз циліндрів ДВЗ, при реалізації якої застосовано принцип протягування – інструмент з антифрикційним брусками здійснює зворотньо-поступальний рух з

одночасним дискретним обертанням деталі (автори: І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, Е.К. Посвятенко) [4];

- розробка конструкції пристрою для ФАБО складнопрофільних поверхонь на прикладі кулачків розподільного валу ДВЗ (автори: А.М. Красота, І.В. Шепеленко, М.В. Красота) [5].

Результати цих робіт переконливо свідчать про те, що формування антифрикційних покриттів на поверхнях деталей із чорних металів – зокрема ФАБО – є стратегічно обґрунтованим і перспективним напрямом.

Література

1. Укрметалургпром. Результати діяльності металургійної галузі України. Річні звіти 2020–2025 рр.

2. Солових Є.К. Тенденції розвитку технологій поверхневого зміцнення у машинобудуванні : монографія. – Кіровоград : КОД, 2012. – 92 с.

3. Shepelenko I.V. Technological factors influence on the antifric-tion coatings quality // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – Хмельницький, 2021. – Т. 26, № 2/100. – С. 50–57.

4. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Stepchyn Y., Mahopets S., Melnyk O. Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifric-tion Coating and Deforming Broaching / In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Trojanowska J., Oborskyi G., Pavlenko I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2024. P. 209–218.

5. Шепеленко І.В., Красота А.М., Гуцул В.І., Красота М.В. Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом // Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки. – № 11 (42)_II, 2025. – С. 169–176.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ВИРОБІВ З ОПТИЧНОГО СКЛА

Для виявлення закономірностей процесу впливу електронного потоку на оптичні матеріали та керування режимами їх обробки необхідним є знання змін структури модифікованих шарів матеріалів, висоти залишкових мікронерівностей на оброблених поверхнях оптичного скла та глибини їх проплавлення в залежності від режимів обробки, що реалізуються на практиці (густина теплового впливу СЕП $F_n = 10^6 - 5 \cdot 10^8$ Вт/м² та швидкості його переміщення відносно виробу $V = 0 - 0,1$ м/с при коефіцієнті зосередженості $k = 3,5 - 4,0 \cdot 10^6$ м⁻²).

В результаті аналізу електронно-мікроскопічних досліджень поверхні виробів з оптичного скла марок К-8, К-208 та ін., представлених на рис. 1, встановлено, що на поверхні виробів після механічної обробки є неоднорідності типу подряпин, мікротріщин та нерівностей, кількість яких помітно зменшується після електронної обробки.

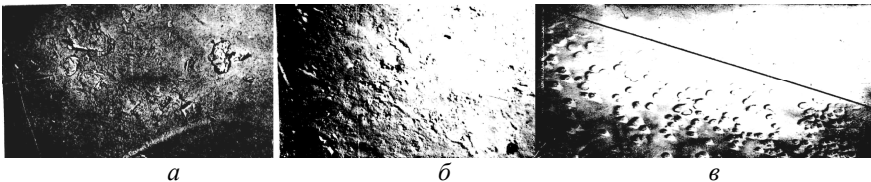


Рис. 1 – Електронно-мікроскопічні знімки поверхні скла К-8:

a – поверхня скла К-8 після механічної обробки, $\times 3700$; *б* – поверхня скла К-8 після електронної обробки, $\times 4500$; *в* – для скла К-208: зверху – поверхня скла К-208 після електронної обробки, $\times 20000$; знизу – поверхня скла К-208 після механічної поліровки, $\times 20000$

При вивченні поверхонь зломів (фрактограм) виробів з оптичного скла до та після електронної обробки встановлено, що більш дрібнозернистий злам має місце у виробках, які піддані впливу електронного потоку.

Аналіз поперечних шліфів, відколів – зламів виробів з оптичних стекол після механічної поліровки та електронної обробки по-

казує, що: чіткої границі між обробленою потоком поверхнею та самою основою матеріалу виробу не спостерігається; є суттєва відмінність сторін виробу – обробленої та необробленої; відбувається модифікація структури поверхні на глибину 200–220 мкм з найбільш суттєвою її зміною у оплавленому шарі з елементами “в’язкого” руйнування.

Результати досліджень поверхонь виробів з оптичного скла методом РЕМ показали, що на поверхні механічної обробки скла (К-108, К-208 та ін.) найбільш характерним є наявність різних мікронерівностей – дрібних тріщин глибиною до 0,1–1,0 мкм, тонких подряпин довжиною до 2–10 мкм, а також “горбиків”, пухирців та ін., розміри яких складають $2 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-2} мкм. Після ж електронно-променевої обробки розміри пухирців (діаметри) на поверхні скла зменшуються у 2–4 рази, при цьому “горбики” та інші мікронерівності розміром менше 1–2 мкм не спостерігаються, тобто в результаті обробки електронним променем поверхня скла “очищується”, дрібні дефекти усуваються.

Аналіз електронно-мікроскопічних знімків поверхонь виробів з оптичного скла, вивчення сканограм поверхонь шліфів з відколів виробів до та після електронно-променевої обробки показують, що у першому випадку висота мікронерівностей складає 30–40 нм, а у другому – знижується до рівня 0,5–1,2 нм.

Детальні дослідження структури поверхні виробів з оптичного скла дозволили визначити наступний вплив технологічних параметрів електронного потоку на висоту залишкових мікронерівностей (рис. 2, 3): збільшення густини теплового впливу електронного потоку F_n від 10^6 Вт/м² до $5 \cdot 10^8$ Вт/м², наприклад, для використаної на практиці швидкості його руху $V = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, призводить до зменшення висоти залишкових мікронерівностей від 3,6–5,0 нм до 0,5–1,2 нм; при цьому, характер впливу F_n та V на R_a не залежить від марки скла.

Для чисельного прогнозування та оптимізації ступеня впливу технологічних параметрів електронного потоку на висоту залишкових мікронерівностей оброблених поверхонь виробів з оптичного скла (К-8, К-108, К-208, ТФ-110, БК-10) за допомогою розробленого спеціалізованого пакета прикладних програм по методам регресії та інтерполяції була отримана наступна експериментально-статистична модель (відносна похибка 5–8%):

$$R_a = 15,123 \cdot F_n^{0,056-46,847 \cdot V+558,735 \cdot V^2} \cdot V^{-0,478}$$

де R_a – нм; F_n – Вт/м²; V – м/с.

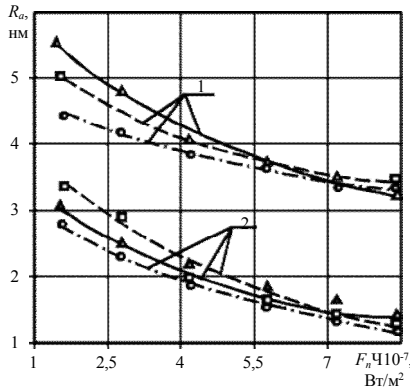


Рис. 2 – Залежність висоти залишкових мікронерівностей поверхні оптичного скла від густини теплового впливу електронного потоку:
 1 – $V = 8 \cdot 10^{-2}$ м/с; 2 – $V = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с; ——— скло К-8; - - - - скло ТФ-110;
 — · — · — · — скло БК-10; Δ , \circ , \square – експериментальні точки

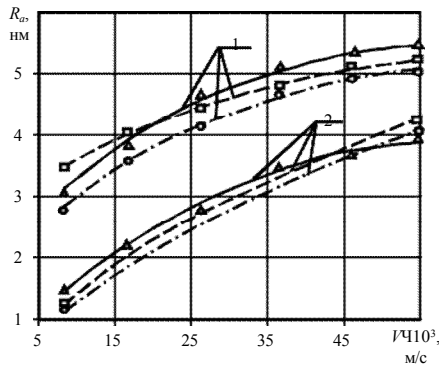


Рис. 3 – Залежність висоти залишкових мікронерівностей поверхні оптичного скла від швидкості руху електронного потоку:
 1 – $F_n = 10^6$ Вт/м²; 2 – F_n від $4 \cdot 10^8$ Вт/м²; ——— скло К-8; - - - - скло ТФ-110; -
 — · — · — · — скло БК-10; Δ , \circ , \square – експериментальні точки

Література

1. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів : монографія / В. А. Ващенко та ін. – Київ : Наукова думка, 2011. – 562 с.

2. Handbook of Optical Engineering / ed. by Daniel Malacara. – CRC Press, 2020.
3. Бочок М. П., Будко Н. П., Ващенко В. А. Спеціальні методи обробки оптичного скла. – Чернігів : ЧДТУ, 2001. – 215 с.
4. Yatsenko I. V., Antonyuk S. V., Gordienko V. I., Vaschenko V. A. Determining the Critical Parameters of the Electron Beam with Surface Melting of the Optical Elements of Precision Instrumentation // J. Nano-Electron. Phys. – 2017. – Vol. 9, no. 1. – P. 01010.
5. Yatsenko I. V., Antonyuk V. S., Gordienko V. I., Kiritchenko O. V., Vaschenko V. A. The Increase in the Probability of Failure-Free Operation of the IR-Devices Homing and Tracking by the Electron Beam Processing of Optical Fairings on the Areas // J. Nano-Electron. Phys. – 2018. – Vol. 10, no. 4. – P. 04028.
6. Yatsenko I. V., Antonyuk V. S., Vashchenko V. A., Gordienko V. I., Kolinko S. O., Butenko T. I. Determination of Optimal Modes of Electron-Beam Micro-Treatment of Surfaces in Optic Elements // J. Nano-Electron. Phys. – 2022. – Vol. 14, no. 4. – P. 04012.

ЗМІСТ

<i>Андрєєв І.В., Шеремет В.І., Шейкін С.Є., Студенець С.Ф., Клименко С.А.</i> НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОЛЬФРАМОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ КІНЕТИЧНИХ ПІНЕТРАТОРІВ	3
<i>Антіпін Є.В., Дідковський О.В., Зяхор І.В., Левчук А.М., Шило Ю.А., Кавуніченко О.В.</i> ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК, ВИКОНАНИХ КОНТАКТНИМ СТИКОВИМ ЗВАРЮВАННЯМ ОПЛАВЛЕННЯМ	6
<i>Антонюк V.S., Vislough S.P., Voloshko O.V.</i> TECHNOLOGICAL PARAMETERS RESEARCH OF MILLING ORGANOPLASTICS	9
<i>Балицька Н.О.</i> РЕЖИМ ЗМОЧУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВУ НІТІ, ТЕКСТУРОВАНИХ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯМ	11
<i>Беженар М.П., Пацик А.М., Соколов О.М., Романенко Я.М.</i> НОВІ РСВН КОМПОЗИТИ VL ГРУПИ – ПРОГРЕСИВНІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ	14
<i>Береговець Б.С., Данюк О.О., Коваленко М.І., Ночвай В.М., Полонський Л.Г.</i> РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАНЬ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ РОБОЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ НА СУПОРТІ УСТАНОВКИ КНПА-1,2М	16
<i>Візняк В.Г., Скуріхін Д.Г.</i> ОРГАНІЗАЦІЙНО-ДОКУМЕНТАЦІЙНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ	17
<i>Вовк В.А.</i> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПОНОВОК МОБІЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ РЕМОНТІ ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛІВ	19

<i>Гнатенко І.О., Черніснко О.І., Андрєєв І.В.</i> ВПЛИВ БАРИЧНОЇ ОБРОБКИ СПЕЧЕНИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ WC-15% Me НА ЇХ КОЕРЦИТИВНУ СИЛУ	21
<i>Губатюк Р.С., Прокоф'єв О.С., Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Абдулах В.М., Коваленко Д.В., Нікрітін О.Л., Романенко І.М., Милашенко Н.В., Сорока Б.С., Згурський В.О. Воробійов М.В.</i> ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕКУПЕРАТОРА УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ПОВОРОТНОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ	23
<i>Гуцин К.В., Зяхор І.В., Завертанний М.С., Шило Ю.А., Левчук А.М., Кольцов В.В., Наконечний А.О.</i> ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ НАГРІВАННЯ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ ПРОФІЛІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	25
<i>Девін Л. М., Цисар М.О., Лециук О.О., Ричев С.В., Ільницька Г.Д.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВИСОКОМІЦНИХ ТЕРМОСТІЙКИХ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ ТИПУ ІЬ РОЗМІРОМ 1,5–3,0 ММ, ДЛЯ ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНОГО БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ	28
<i>Зяхор І.В., Левчук А.М., Кольцов В.В., Шило Ю.А., Завертанний М.С.</i> ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ В ЗОНІ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ	31
<i>Кириченко І.О., Воронцов Б.С.</i> СЕРТИФІКАЦІЯ І СТАНДАРТИЗАЦІЯ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ	36
<i>Клименко Г.П., Рева Є.С., Захаров Є.О., Чумаченко В.П.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ НА ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ	39
<i>Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан., Чумак А.С., Копейкіна М.Ю., Камчатна-Степанова К.В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ ІЗ PcbN	42

<i>Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Пономаренко О.В., Підгорний М.І.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМОНТУ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	43
<i>Ковальов В.Д., Міхеєв А.О.</i> ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕРТЯ В НАПРЯМНИХ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ ПРИ РЕМОНТІ ТА ВІДНОВЛЕННІ	46
<i>Кусий Я.М., Кусень Н.А., Климаш І.В., Брухаль П.Р., Конюх О.І.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЩЕННЯ РІЗЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ	48
<i>Кусков Ю.М., Нетяга А.В., Проскудін В.М., Римар С.В., Лентюгов І.П., Окопнік Л.Л., Осін В.В.</i> ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІДВИДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ БІМЕТАЛЕВИХ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОВШІВ КАР'ЄРНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ	52
<i>Куць Н.Г.</i> ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ У СУЧАСНОМУ МАШИННОМУ ВИРОБНИЦТВІ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАНДАРТІВ	56
<i>Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Солод В.Ю., Музичка В.А., Проц Л.А.</i> СУЧАСНІ РОЗРОБКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІПШЕНИХ ТВЕРДИХ СПІЛАВІВ	59
<i>Лавріненко В.І., Скрябін В.О., Солод В.Ю., Крикент І.І.</i> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СПРЯМОВАНОМУ ВПЛИВОВІ НА КОНТАКТНІ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ЗМІНИ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ І ЗМЕНШЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ	64
<i>Лавріненко В.І., Смоквина В.В., Ільницька Г.Д., Островерх Є.В.</i> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У СПРЯМОВАНОМУ СТВОРЕННІ ПОРИСТОСТІ У ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ І МОНОКРИСТАЛІЧНИХ АЛМАЗАХ ТА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОМУ ІНСТРУМЕНТІ	67
<i>Логінова Ю.В.</i> МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ НК ТА ТД ДЛЯ ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	72

<i>Lopata O.V., Pisarenko G.S., Katerinich S.Y., Rybak I.P.</i> DEPENDENCE OF THE ELASTIC MODULUS OF POWDER COATINGS ON THEIR POROSITY IN ELECTRICAL CONTACT HARDENING	76
<i>Лопата Л.А., Рутковський А.В., Буйських К.П.</i> СПОСОБИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ	78
<i>Lopata V.M., Solovykh A.Y., Kachynska I.R., Pisarenko, G.S.</i> INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY ELECTRIC ARC SPRAYING	82
<i>Майданчук Т.Б., Лук'янченко Є.П., Степченко Д.М., Лантєва Г.М.</i> ОТРИМАННЯ АНТИФРИКЦІЙНОГО ШАРУ НИЗЬКООЛОВАНОЇ БРОНЗИ НА СТАЛІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ MIG-ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ	84
<i>Манохін А.С., Клименко С.А.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОСТІЙКИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА РІЗНИЦЮ ТЕМПЕРАТУР НА ЇХ ПОВЕРХНЯХ	87
<i>Мельнічук Ю.О., Чумак А.С., Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан., Мельнічук Б.Ю.</i> ОСОБЛИВОСТІ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ PcbN ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ТОЧІННІ ВИСОКОМІЩНОГО ЧАВУНУ ВЧ40	89
<i>Наконечний А.О, Шевчук С.А., Гуцин К.В., Шило Ю.А., Левчук А.М., Зягор І.В., Завертанний М.С., Кольцов В.В.</i> ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ЗУБІВ РОЗПУШУВАЧА БАРОВОГО ЛАНЦЮГА	91
<i>Нерубацький В.П., Геворкян Е.С., Комарова Г.Л.</i> СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАНОКЕРАМІКИ ZrO ₂ -WC ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ І ТРАНСПОРТУ	93
<i>Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А., Базалій Г.А., Заболотний С.Д., Сизоненко О.М., Циба М.М.</i> ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ДЛЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ	96

<i>Пацук А.М., Беженар М.П., Романенко Я.М., Соколов О.М.</i> ФОРМУВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ РСВН КОМПОЗИТИВ СИСТЕМИ cVN–TiC–Al	99
<i>Петасюк Г.А., Бочечка О.О., Сирота Ю.В., Петасюк О.У., Смірнова А.В.</i> ВІД АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРЕН ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗД ЇХ ФОРМИ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ОКРЕМИХ МОРФОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕЛЕМЕНТІВ ШІ-ТЕХНОЛОГІЙ	102
<i>Петасюк Г.А., Лавріненко В.І., Полторацький В.Г.</i> МІКРО- ЧИ НАНО: ЯКОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ПОРОШКИ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ БАЖАНО ЗАСТОСОВУВАТИ ДЛЯ ПОКРИТТЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ ДЛЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ: МОРФОМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД	106
<i>Равлюк В.Г.</i> ПРОАКТИВНЕ МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕТАПУ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА	111
<i>Равлюк В.Г., Захаров А.В.</i> АДАПТИВНІ ПІДХОДИ ДО МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПІДТРИМКИ НЕСТАНДАРТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ У РЕМОНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	113
<i>Рябченко С.В., Бандуренко М.В., Клименко С. Ан., Чумак А.О.</i> ВИГОТОВЛЕННЯ КАТОДІВ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ	115
<i>Сахнюк І.О., Битков М.Х., Кириленко Л.В., Федосєєва І.К., Тітова Г.М.</i> ПРОПОЗИЦІЇ ДО ВИРІШУВАННЯ ПЕВНИХ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ	116
<i>Смоквица В.В., Лавріненко В.І., Гльницька Г.Д., Зайцева І.М., Шейко М.М., Тимошенко В.В., Діюк В.С.</i> ВПЛИВ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СИНТЕТИЧНИХ АЛМАЗІВ МАРКИ АС80 ЗЕРНИСТОСТІ 315/250 НА ЇХ ОДНОРІДНІСТЬ ЗА ЛІНІЙНИМИ РОЗМІРАМИ ТА МІЦНІСТЮ	119
<i>Тимофєєва Л.А.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ	121

<i>Тимофєєва Л.А., Сайчук К.О.</i> ІНТЕГРАЛЬНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МЕТРОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЕРТНИХ ПОСЛУГ	123
<i>Тимофєєва Л.А., Устименко О.Г.</i> КОМПЛЕКСНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ	125
<i>Тимофєєва Л.А., Шипіло Р.Г.</i> ІНТЕГРАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ В СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА	127
<i>Томашевський О.О.</i> ВІБРАЦІЇ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВУ NiTi	129
<i>Хітров І.О.</i> ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧИХ І РЕМОНТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ	131
<i>Цисар М.О., Псярнецька Т.О., Девін Л. М., Ричев С.В., Льницька Г.Д., Зайцева І.М.</i> ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ, ЩО ВИНИКАЄ ПРИ ОБЧИСЛЕННІ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ ТЕРМОСТІЙКИХ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ ТИПУ Іb	133
<i>Шейкін С.Є., Студенець С.Ф., Дідковський Т.М.</i> ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВТУЛОК З КРУГЛИМ ТА ФАСОННИМ ОТВОРОМ ЗАСТОСУВАННЯМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ	137
<i>Шепеленко І.В., Красота А.М., Красота М.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Н.І.</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ	141
<i>Яценко І.В., Ващенко В.А., Колінько С.О., Цибулін В.В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ВИРОБІВ З ОПТИЧНОГО СКЛА	144

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ І НА ТРАНСПОРТІ

Матеріали 26 Міжнародного науково-технічного семінару

30 березня – 02 квітня 2026 р.

Мови семінару: українська, англійська

Комп'ютерна верстка
Марина КОПЄЙКІНА

Асоціація технологів-машинобудівників України
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2

Tel. +38044-4308500, +38050-3311922, +38050-3311923

www.atmu.net.ua

E-mail: atmu@ism.kiev.ua, atmu@meta.ua, atmu1@meta.ua

Підписано до друку 20.03.2026 р.

Формат 60x84/16.

Папір офсет.

Гарнітура Times New Roman.

Умов. надр аркуш. 9,25.

Зам. № 3967.



Віддруковано в ПП «Рута»

10014, Україна,

м. Житомир, вул. Мала Бердичівська, 17 а,

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3671

від 14.01.2010

E-mail: ruta-bond@ukr.net

тел. 0679621687

