



Всеукраїнська громадська організація  
Асоціація технологів-машинобудівників України  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України

Академія технологічних наук України

ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»

ТОВ «НПП РЕММАШ»

Український державний університет залізничного транспорту  
Суспільство інженерів-механіків НТУ України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ПАТ «Ільницький завод МЗО»  
Машинобудівний факультет Белградського університету

# **ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ТА РЕНОВАЦІЯ ВИРОБІВ**

**Матеріали 24-ї Міжнародної  
науково-технічної конференції**

*26–27 червня 2024 р.*

Київ – 2024

**Інженерія поверхні та реновація виробів:** Матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – 134 с.

### **Наукові напрямки конференції**

- Наукові основи інженерії поверхні:
  - матеріалознавство
  - фізико-хімічна механіка матеріалів
  - фізико-хімія контактної взаємодії
  - зносо- та корозійна стійкість, міцність поверхневого шару
  - функціональні покриття поверхні
  - технологічне управління якістю деталей машин
  - питання трибології в машинобудуванні
- Технологія ремонту машин, відновлення і зміцнення деталей
- Впровадження стандартів ДСТУ ISO 9001 у промисловості, вищих навчальних закладах, медичних установах і органах державної влади
- Метрологічне забезпечення ремонтного виробництва
- Екологія ремонтно-відновлювальних робіт

**Матеріали представлені в авторській редакції**

© АТМ України,  
2024 р.

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

## **ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ ІМПУЛЬСНИМИ ЛАЗЕРАМИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Серед основних досягнень у галузі прогресивних технологій зміцнення матеріалів можна виділити один з найбільш перспективних напрямків підвищення експлуатаційних характеристик поверхні деталей – лазерну обробку, яка за допомогою цілеспрямованої зміни структури матеріалів лазерним променем дозволяє отримувати специфічні нетрадиційні комбінації фізичних, хімічних та механічних властивостей у поверхневих робочих шарах.

Термічне зміцнення вуглецевих і легованих сталей лазерним випромінюванням, яке засноване на локальному нагріванні ділянки поверхні під впливом випромінювання та охолодження цієї ділянки з надкритичною швидкістю після припинення впливу за рахунок тепловідведення у внутрішні шари металу, може стати перспективним напрямом у майбутньому.

Потужність та енергія випромінювання є основними параметрами лазерного пучка. Для поверхневої обробки матеріалів до теперішнього часу застосовувалися твердотільні або газорозрядні CO<sub>2</sub>-лазери потужністю понад 1 кВт, надійні в експлуатації з автоматизованою системою управління технологічного комплексу. Висока вартість таких комплексів та їх низька продуктивність обмежують застосування лазерного термічного чи хіміко-термічного зміцнення. Ця проблема може бути вирішена шляхом використання лазерів нового покоління.

На сьогоднішній день найбільш перспективними технологічними інструментами є волоконні лазери.

До переваг волоконних лазерів слід віднести високу ефективність (до 50 %), що веде до зниження експлуатаційних витрат; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх в існуючі системи виробництва. Однак їх вартість поки залишається дуже високою, що також не дозволяє говорити про їх широке використання.

При обробці поверхні сталей і сплавів імпульсним лазерним випромінюванням проявляється ряд особливостей порівняно з безперер-

вним. По-перше, завдяки меншій довжині хвилі імпульсне випромінювання більше поглинається поверхнею матеріалів. По-друге, за рахунок зменшення розфокусування лазерного променя при одній і тій ж потужності лазера можна досягти значного підвищення щільності потужності в імпульсі.

Температура нагрівання матеріалу значно зростає, і тугоплавкі сполуки, що є в структурі поверхневого шару, розплавляються. І, по-третє, швидкості охолодження поверхні матеріалів після імпульсної обробки в 100-1000 разів вище аналогічних для безперервного випромінювання. В результаті отримують унікальні структури та властивості обробленої поверхні [1, 2].

У цій роботі була зроблена спроба обґрунтувати можливість використання лазерів низької потужності, що працюють в імпульсному режимі, для поверхневого лазерного гартування деталей або окремих їх ділянок. Традиційно лазери потужністю менше 0,5 кВт для цих цілей не використовуються.

Як матеріали для досліджень обрали вуглецеві сталі з різним вмістом вуглецю: сталь 20 і сталь 45. Зразки піддавалися попередній термічній обробці – гартування з охолодженням у воді та відпуску при температурі 600 °С (покращення, режим 1) та нормалізації (режим 2). З метою збільшення поглинальної здатності поверхні зразки після відпуску не полірувались.

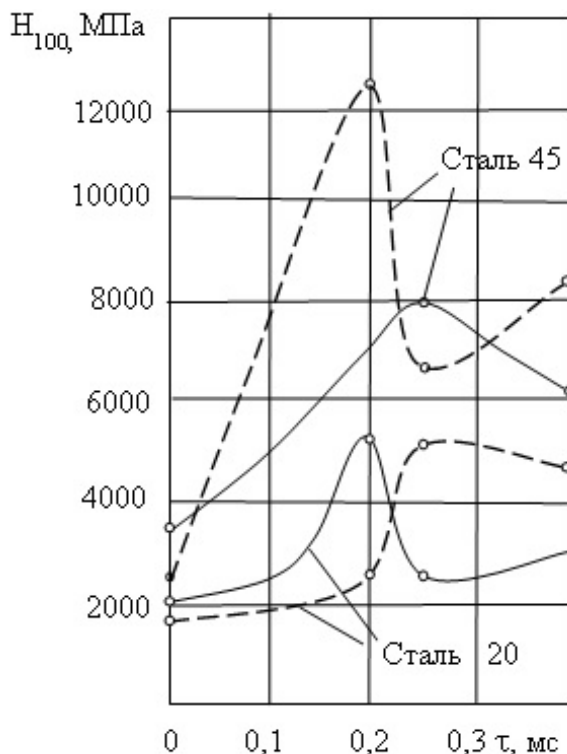
Лазерне зміцнення проводилося з використанням неодимового лазера YAG: Nd + 3 потужністю 10 Вт. Швидкість сканування становила 1–2 мм/с. Частота проходження імпульсів 20 Гц. Основним параметром, що варіюється, була тривалість імпульсу.

Як параметр контролю властивостей зміцненого шару була обрана мікротвердість.

Покращення формує структуру сорбіт відпуску (феритоцементитна суміш зі сферичними карбідами, рівномірно розподіленими в матриці). Структура сталей 20 та 45 після нормалізації – феритоперлітна (пластинчасті карбіди). Наступне лазерне гартування в імпульсному режимі призводить до утворення загартованих структур. При цьому для кожної сталі існує певне значення тривалості імпульсу, що дозволяє отримати максимальну твердість (рис. 1, режим 1 – суцільна лінія, режим 2 – штрихова лінія).

При підвищенні вмісту вуглецю оптимальна тривалість імпульсу збільшується з 0,2 (сталь 20) до 0,25 мс (сталь 45). Порівняння отриманих значень з мікротвердістю контрольних зразків (об'ємне гарту-

вання) показує, що лазерне зміцнення дає більш високі значення, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20.



**Рис. 1 – Залежність мікротвердості вуглецевих сталей від тривалості імпульсу**

При підвищенні вмісту вуглецю оптимальна тривалість імпульсу збільшується з 0,2 (сталь 20) до 0,25 мс (сталь 45). Порівняння отриманих значень з мікротвердістю контрольних зразків (об'ємне гартування) показує, що лазерне зміцнення дає більш високі значення, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20.

Зі збільшенням кількості вуглецю мікротвердість зміцненого шару зростає.

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення сталей малопотужними лазерами при використанні імпульсного режиму. Проте продуктивність такого процесу низька, що не дозволяє зміцнювати поверхні деталей великої площини.

Виходячи з вищесказаного, можна припустити, що найбільш перспективними напрямками будуть локальне зміцнення деталей у місцях їх зносу зі збереженням вихідних властивостей в іншому обсязі, створення «плямистого» поверхневого зміцнення, при якому не утворю-

ється суцільного крихкого шару, схильного до розтріскування та відшаровування.

Необхідно продовжити дослідження впливу вихідної структури і параметрів випромінювання імпульсних лазерів малої потужності на властивості зміцнених шарів.

**Висновки.** Таким чином, незважаючи на малу потужність використовуваного лазера, імпульсний режим все ж дозволяє проводити поверхневе гартування сталевих виробів. Існує оптимальна тривалість імпульсу, що дозволяє одержувати найбільш ефективно зміцнення. Оптимальна тривалість імпульсу залежить від вмісту вуглецю в сталі. Лазерне гартування дозволяє отримувати значно більш високу твердість, ніж об'ємне, причому найбільший ефект отриманий на низьковуглецевій сталі. Регулювати процес зміцнення можна зміною часу впливу або підбором вихідних структур.

### **Література**

1. Афанасьєва, О.В. Дослідження впливу імпульсного лазерного гартування на властивості вуглецевих сталей / О.В. Афанасьєва, І.В. Дощечкіна, Н.О. Лалазарова, П.А. Ситников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. XXVI міжнарод. наук.- практ. конф. MicroCad-2018. – Харків : НТУ "ХП", 2018. – ч. 4. – С. 266–267.

2. Rathmann, Lewin. Influence of laser hardening on laser induced periodic surface structures on steel substrates / Lewin Rathmann, Tim Radel // 2021 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. – 1135 012024.

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

## **ЩОДО ПОШУКУ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР**

На підприємствах залізничного транспорту в останні роки приділяється велика увага розробці та впровадженню ресурсозберігаючих та екологічно чистих технологій ремонту і відновлення компонентів рухомого складу.

Сьогодні важко уявити хоча б одну галузь промисловості або вид транспорту, де при ремонті не використовувалися б технологічні методи та способи відновлення їх експлуатаційних характеристик.

Організація обслуговування і ремонту тягового рухомого складу залізничного транспорту України протягом багатьох десятиліть базується на системі планово-попереджувального ремонту, яка регламентує нормативну фіксовану періодичність і набір обсягів основних ремонтних робіт [1]. При цьому застосовуються єдині технології і стандарти виконання технічного обслуговування та поточного ремонту рухомого складу.

Зі збільшенням обсягу перевізної роботи передбачається зростання маси поїздів, а також збільшення нормальних, тягових і гальмівних сил у потязі. Це вже зараз призводить до інтенсивного контакту коліс рухомого складу з рейками. Питання про те, як збільшення вантажно-напруженості впливає на знос, пошкоджуваність та надійність роботи цього критичного вузла тертя у рухомого складу, стає знову надзвичайно актуальним [2].

Через колісно-рейковий контакт передаються всі навантаження від перевезених вантажів і маси рухомого складу, включаючи прискорюючі, уповільнюючі та направляючі сили, необхідні для руху поїздів. Величина допустимих зусиль, що передаються від колеса до рейки, залежить від властивостей матеріалів цієї пари тертя, конструкції та можливостей рухомого складу і колії, режиму ведення поїзда і впливу навколишнього середовища.

Актуальність численних досліджень проблеми взаємодії рухомого складу з колією обумовлена тим, що ця проблема, окрім економічного аспекту (втрати енергетичних ресурсів через опір руху, знос коліс та рейок тощо), тісно пов'язана з безпекою руху на залізничному транспорті. Аналіз та оцінка сил тертя в реальному контакті колеса з рейкою дозволяють глибше зрозуміти природу зчеплення коліс рухомого складу з рейками і розробити ефективні методи управління цим зчепленням в експлуатаційних умовах різних кліматичних зон і різних рівнях забруднення навколишнього середовища.

Умови роботи вузлів тертя визначають ряд вимог до їх матеріалів: висока міцність при достатньому запасі пластичності, підвищена теплопровідність, високий модуль пружності, підвищена зносостійкість і гарна припрацьовуваність. Одним з найбільш відповідальних вузлів механічної частини рухомого складу є колісні пари, які, як правило, обмежують міжремонтні пробіги. Проблема зносу колісних пар на даний момент стоїть особливо гостро [2].

До факторів, що впливають на їх працездатність і зносостійкість, належать взаємодія параметрів колії та рухомого складу, властивості поверхневих шарів колеса і рейки, умови гальмування, гальмівні колодки, тощо. Основними несправностями колісних пар є: прокат ободів коліс, знос ободів по товщині, вертикальний підріз гребенів, повзуни, вищерблені і раковини на поверхні кочення, знос і пошкодження шийок осей, тріщини в осях, потертість і вигин осей, ослаблення і зрушення колеса по осі, а також тріщини в колесах.

При відновленні деталей рухомого складу важливу роль відіграє попередня підготовка поверхні, зокрема усунення дефектів, які утворилися в процесі експлуатації. Важливим фактором є матеріал інструменту, яким усувають різного роду дефекти.

На даний час у залізничних депо України для обробки зношених залізничних коліс використовуються твердосплавні непереточувані ріжучі пластини різних іноземних виробників. Проте, при обробці колісних пар без викатки, часто відбувається поломка однієї або кількох пластин, що призводить до необхідності переривання процесу різання і заміни зламаних пластин на нові.

В останні роки широкого розповсюдження набули інструменти, виготовлені за допомогою нанотехнологій. Експлуатаційні властивості таких ріжучих інструментів значною мірою залежать від їх структурного стану, який, у свою чергу, є результатом різних технологічних операцій отримання і обробки цих матеріалів [2].

Новим напрямком технології відновлення зношених поверхонь є поєднання якісної підготовки поверхні та застосування нових ресурсозберігаючих екологічно чистих технологій, таких як наплавлення. Застосування технології наплавлення при відновленні коліс є економічно вигідним. Відновлення наплавленням дозволяє зменшити відходи металу обода при його механічному обточуванні за профілем кочення, а також підвищити зносостійкість колеса за рахунок наплавлення металу з наперед заданими властивостями.

Для цього використовуються методи дугового наплавлення під шаром флюсу дротами суцільного перетину, а також спеціальне зварювальне та допоміжне обладнання. Однак, технології відновлення наплавленням коліс, що застосовуються зараз, не завжди враховують всі фактори, які впливають на надійність відновлених виробів [3,4]. В результаті, в деяких випадках, при наплавленні утворюються тріщини, що значно підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації і може призвести до суттєвих пошкоджень залізничного транспорту.

Зварюваність високоміцних вуглецевих сталей, включаючи сталі, що використовуються для виготовлення коліс, досі практично не досліджувалась, про що свідчить відсутність інформації у спеціалізованій літературі. Тому розробка науково обґрунтованих технологій наплавлення залізничних коліс, які базуються на результатах глибоких досліджень впливу дугового зварювання на структурні зміни та властивості металу в зоні термічного впливу колісних сталей, залежно від вмісту в них вуглецю, є актуальним завданням. Особливо важливо врахувати опірність наплавлень уповільненому і крихкому руйнуванню при статичних та циклічних навантаженнях. Це дозволить суттєво підвищити безпеку руху на залізничному транспорті в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень [3, 4].

Варто зазначити, що відновлення наплавленням сьогодні дозволено галузевими нормативними документами та застосовується при ремонтах залізничних коліс вантажних вагонів магістрального транспорту, коліс та бандажів транспорту гірничо-збагачувальних і металургійних підприємств, кранових коліс, а також бандажів трамвайних коліс міського транспорту.

Один із можливих технологічних процесів наплавлення залізничних коліс розглянуто співробітником Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Гайворонським О.А. в роботах [3, 4].

Більш детально своє бачення рішення проблеми підвищення ефективності відновлення залізничних колісних пар авторами буде розкрито у доповіді.

## **Література**

1. Наказ N-429 – Ц/Од від 15.10.2015 р. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу. – К. : Укрзалізниця, 2015. – 23 с.

2. Остапчук, В.М., Шляхи удосконалення технології відновлення деталей рухомого складу / В.М. Остапчук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – №5. – С. 80–82.

3. Гайворонський, О.А. Умови забезпечення якості відновлених наплавленням залізничних коліс / О.А. Гайворонський // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2016. – №5(65). – С. 136–151.

4. Гайворонський, О.А. Технологія відновлення залізничних коліс дуговим наплавленням / О.А. Гайворонський // Технологія конструкційних та функціональних матеріалів. – 2019. – 9. – С.147.

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

## **ОБРОБКА СУЧАСНИХ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ В ЛІТАКОБУДУВАННІ**

У зв'язку з розвитком науково-технічного прогресу і формуванням технологічного укладу з'являються нові вимоги до сучасних виробів, які не можуть бути задоволені при використанні матеріалів попередніх поколінь. Для успішного виходу на новий рівень розвитку техніки необхідно вирішити проблему, пов'язану з потребами в нових матеріалах.

На сьогоднішній день полімерні композиційні матеріали (ПКМ) використовуються вже в багатьох галузях промисловості завдяки доступності сировини і накопиченому досвіду їх застосування. Основна перевага ПКМ над металами – високою питомою міцністю і модулем пружності при значно меншій щільності, спостерігається стала тенденція – заміна різних елементів авіаційної техніки з металів на елементи з різноманітних ПКМ.

Складнощі при механічній обробці ПКМ визначаються їх фізико-механічними характеристиками: схильністю до розшарування в процесі обробки через їх шаруватість, структурну неоднорідність, високу твердість матеріалу наповнювача і низьку пластичність сполучного та ін.

При обробці ПКМ необхідно використовувати інструменти зі спеціальними твердосплавними або алмазними покриттями різальної кромки інструменту, а також враховувати якість, способи заточування, конструкцію робочих зон і геометричну форму різальних кромки, які б забезпечували обробку двох субстанції матеріалу, з яких складається ПКМ, – високов'язкої полімерної матриці і високоміцного і високомодульного наповнювача.

Встановлено експериментальні закономірності впливу режимів різання на температуру при обробці різних композитів. При обробці ПКМ (з урахуванням їх теплофізичних характеристик) максимальні температури в зоні контакту деталі з інструментом спостерігаються при середніх швидкостях різання, так як в цьому випадку збільшується пластична деформація полімеру. При високих швидкостях різання і мінімальному тепловиділенні полімер не переходить в пластичний стан, що призводить до крихкого руйнування в зоні різання – відбувається локалізація зони руйнування і зниження температури в зонах об-

робки. Для ПКМ необхідно застосовувати свої спеціальні режими різання, особливо при обробці металокомпозитних пакетів з урахуванням розташування шарів матеріалів в залежності від напрямку обробки. При виборі інструмента необхідно враховувати особливості структури ПКМ. Чим більш в'язка матриця, тим сильніше йде нагрівання при різанні і відбувається налипання сполучного на різальну кромку з інтенсивним нагріванням інструменту і деталі, що позначається на якості обробленої поверхні. Вибір інструмента не повинен бути обмежений тільки твердосплавними свердлами, що не дозволяє дати об'єктивну оцінку оптимізації вибору марки і матеріалу свердла.

З урахуванням вимог, що пред'являються до якості отворів і режимів свердління, при проведенні експерименту зі швидкістю свердління 270 і 430 об/с (при подачі 0,01–0,15 мм/об) вдалося отримати задовільну стійкість інструменту (750 отворів до його заміни) [14].

Основними дефектами, що виникають при механічній обробці, є: розтріскування сполучного, розшарування, висмикування волокон, непереріз волокон, термічна деструкція сполучної. Різальна кромка зазвичай крихко руйнує матрицю (сполучну) і зрізає армуючі волокна. Для усунення цих дефектів використовують спеціальні конструкції інструментів, оптимізують їх геометричну форму, технологічні режими свердління, використовуючи спеціальні пристосування.

Для обробки ПКМ застосовуються інструменти з гострою різальною кромкою, великим заднім кутом і малим радіусом різальною кромки для забезпечення зрізу волокон з низькою шорсткістю робочих поверхонь, для поліпшення відведення стружки і зниження сил тертя між поверхнями інструменту та заготовки. Крім того, важливо забезпечити високу стійкість інструменту, оскільки армуючі волокна і компоненти матриці ПКМ можуть інтенсивно зношувати різальну кромку, що призводить до збільшення сили різання і тепловиділення, а також зниження якості оброблених поверхонь. У якості інструментальних матеріалів, що забезпечують прийнятну зносостійкість, використовують тверді сплави із зміцнюючими покриттями, ПКНБ, полікристалічні спечені і CVD-алмази. Перспективним є інструмент з алмазними, одержуваними за технологією CVD, і алмазоподібними покриттями [14].

З точки зору геометрії, фрези для ефективної обробки композитів повинні мати невеликі кути нахилу гвинтової лінії, що дозволяють зменшити осьові сили і запобігти поділ шарів матеріалу. Геометрії фрез, як з лівосторонньою, так і з правобічної спіраллю, також ефективні при обробці композитних матеріалів. Ці типи фрез, відомі як компресійні фрезери, направляють стискаючі зусилля різання до

центру заготовки (при бічному фрезеруванні), щоб не пошкодити шари оброблюваного матеріалу. «Seco» створила два типи інструментів з подвійною спіраллю. Один з них – це багатозубий інструмент з рівними різальними кромками. Інший має менше число зубів, що забезпечує простір для відводу стружки, а також стружколом на різальних кромках. Останній інструмент більше підходить для чорнових операцій, в той час як багатозубна фреза без стружколому показує чудові результати на чистових операціях. Якщо розглядати методи обробки, то параметри різання композитів часто залежать від відмінностей самих матеріалів. Зазвичай цільні твердосплавні фрези обробляють композити зі швидкістю 2,5 м/с, а швидкість подачі складає близько 0,07 мм. Вибір зазначених параметрів для різання композитів найчастіше залежить від точки плавлення відповідного оброблюваного матеріалу. Склад і напрям плетіння волокон також істотно впливають на управління швидкостями різання і подачею, а також траєкторією переміщення ріжучого інструменту в процесі обробки.

*Васильчук О.С., Виноградова О.П., Горохов В.Ю.,  
Білорусець В.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України,  
*Плівак О.А.* НТУУ «Київський політехнічний  
інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНЕЙ МІЖ ПОВЕРХНЯМИ ПАРИ ТЕРТЯ «ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ АЛМАЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ (КАМ) ТА ГІРСЬКОЮ ПОРОДОЮ»**

Попередні дослідження топографії робочих поверхонь елементів КАМ виконувались різними методами, включаючи притискання їх у більш пластичний матеріал, такий як алюміній, сплав Вуда, віск або інші матеріали. Поверхні елементів без алмазів також досліджувались під час взаємодії з кругом із електрокорунда. Стан робочої поверхні КАМ є визначальним для формування відповідної поверхні зруйнованої гірської породи. Тому визначення топографії контактуючих поверхонь пари тертя «КАМ – гірська порода», а також оцінювання морфометричного стану продуктів руйнування гірської породи та зношуван-

ня матеріалу КАМ між поверхнями різання, залишається актуальним завданням.

Метою роботи є визначення топографії поверхонь функціональних вставок КАМ на основі зв'язки Ni(94)-Sn(6%) з алмазами марки АС300 різної зернистості та концентрації, а також обробленої цими елементами поверхні зразку Торезького пісковика. Це допоможе встановити вплив зернистості та концентрації алмазів на показники обробленої гірської породи та оцінити стан шламу, який знаходиться між ними.

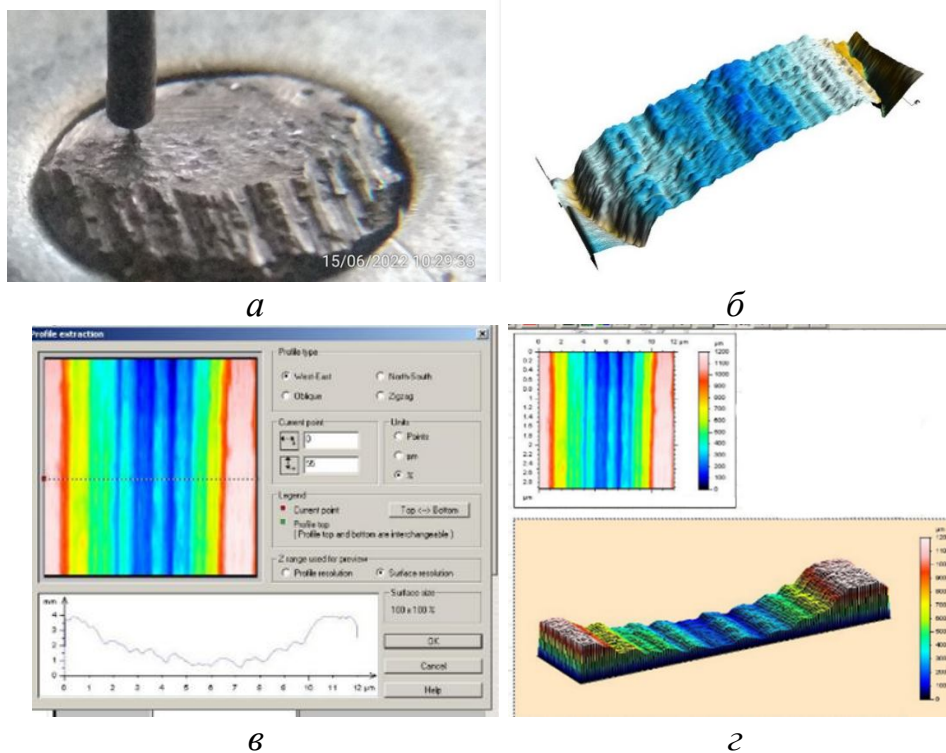
Для дослідження топографії поверхонь використовували контактні щупові, оптичні та лазерні профілографи. Щупові профілографи вимірюють шорсткість алмазною голкою, але їх основний недолік полягає в некоректному вимірюванні перепадів висот при великій шорсткості. Оптичні та лазерні профілографи використовують відбитки світла від поверхні, але їх роздільна здатність недостатня для точного вимірювання рельєфу та через оптичні властивості алмазів.

Для вирішення цих проблем на першому кроці вимірювань використовували модуль на базі профілографа мод. 296, обладнаний алмазним щупом з радіусом округлення вершини 0,01 мм (рис. 1, *a*). Модуль дозволяє вимірювати профіль на площі розміром до 40x40 мм та висотою виступів до 1 мм з точністю до 0,001 мм. Отримані дані оброблялись за допомогою спеціального програмного забезпечення в середовищі програми Mountains (рис. 1, *b–z*).

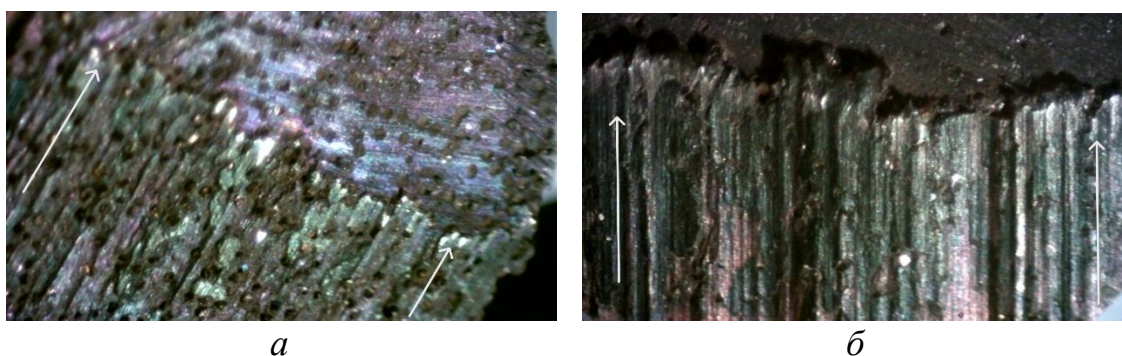
Другий спосіб включав використання безконтактного лазерного 3D сканера Autoscan Inspec фірми Shining 3D з метрологічною точністю 10 мкм. Через прозорість алмазів попередньо були нанесені вуглецеві плівки для подальшого сканування. Після сканування дані обробляли за допомогою програмного забезпечення Blender.

Дослідження поверхонь вставок КАМ та гірської породи проводили 3D щуповим профілографом, що дозволяло отримувати пакет 2D профілограм для аналізу поверхонь (див. рис. 1, *a*). Це дозволило визначати вільні відстані між поверхнями КАМ та гірської породи. Після отримання профілограм, встановлювались відповідні на обох поверхнях реперні точки виступаючих алмазів та відповідні їм точки утворених борозенок в гірській породі, після чого профілограми суміщали за допомогою програмного забезпечення та визначали середні відстані між ними. Дані аналізу показали, що алмазні зерна на робочих поверхнях вставок глибоко проникають в поверхневий шар оброблюваного керна гірської породи під дією прикладеної сили. Так відстань між поверхнею гірської породи та КАМ із алмазами зернистістю 630/500, 500/400 становить 65–110 мкм. Дана відстань дозволяла створювати

фільтраційний канал, об'єм якого достатній для потоку охолоджувальної рідини поверхнею КАМ та відведення відпрацьованого шламу між поверхнями. Однак при наявності алмазів з розмірами 200/160 мкм відстань між ними скорочується до 17–35 мкм. На поверхні елементів КАМ спостерігався пластичний зсув зв'язки (див. рис. 2), що може свідчити про те, що збільшення коефіцієнта тертя спричинило пластифікацію зв'язки. І в цьому випадку зношування відбувається переважно за рахунок закріпленого абразиву.



**Рис. 1 – Зображення процесу вимірювання рельєфу поверхні функціонального елемента з КАМ контактним алмазним щупом (а); досліджуваний профіль поверхні КАМ (б), профіль відповідної пари поверхні гірської породи (в, г)**



**Рис. 2 – Пластичний зсув зв'язки КАМ (вказаний напрям стрілкою) із алмазами зернистістю 200/160 та концентрацією 100% (а) та 25% (б) при різанні гірської породи**

### ***Висновки:***

1. Запропонований метод вимірювання з метрологічною точністю 1 мкм відстаней між поверхнями пари тертя «вставки КАМ – гірська порода» з використанням комбінації щупової та оптичної профілографії.

2. Визначена середня відстань між КАМ з зернистістю 200/160 та гірською породою, яка змінювалась в межах від 17 до 35 мкм, що характеризується пластичним зсувом зв'язки.

3. Для КАМ з розміром алмазів 630/500, 500/400 товщина зазору визначалась в діапазоні 65–110 мкм, що сприяє інтенсивному охолодженню робочої поверхні вставки та ефективному виведенню шламу.

4. Отримані результати можуть бути корисними для обґрунтування оптимізації процесів різання та підвищення ефективності інструментів у вимогливих умовах роботи.

*Величкович А., Роп'як Л., Романів М.*

Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

## **АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТЕРЖНЯ З ПОКРИТТЯМ ПІД ЧАС ЦЕНТРАЛЬНОГО РОЗТЯГУВАННЯ ЧИ КРУЧЕННЯ**

Сучасний ринок техніки все більше заповнюється деталями та елементами конструкцій з різноманітними видами захисних покриттів, а кількість технологій їх отримання невпинно зростає [1–3]. Разом з цим, практичне застосування покриттів часто стикається з проблемою їх передчасного руйнування. Іноді стається так, що захисні покриття в умовах екстремального навантаження, або ж за режимів експлуатації, які не передбачались на стадії проектування, можуть призводити до зниження роботоздатності та погіршення експлуатаційних характеристик виробів порівняно з елементами конструкцій без покриття. Тому до композицій “основний матеріал – покриття” завжди слід ставити особливу вимогу обов’язкового поєднання високого рівня спеціальних властивостей (наприклад зносостійкості, твердості, певних трибологічних властивостей) з достатнім запасом міцності, надійності та довговічності.

Під час експлуатації деталі машин і механізмів піддаються рiнним видам навантажень. Все бiльшого розповсюдження набувають двошаровi покриття [4]. Тому для проведення дослiджень опишемо напружений стан лабораторного зразка з покриттям пiд час центрального розтягування та кручення. Розглянемо вкритий двошаровим покриттям елемент стержня (рис. 1), який навантажують осьовою силою  $N$ , або крутним моментом  $M_x$ . Його попереччя є багатозв'язною областю, де параметри пружності та мiцності змiнюються вiд шару до шару, тобто є кусково-сталими функціями вiд радiальної координати. Вирази напружено-деформованого стану для усiх шарiв матерiалу запишемо на основi однакових статичних та кiнематичних гiпотез лiнiйної теорiї стержнiв [5, 6]. Податливiстю стержня до поперечних деформацiй зсуву та обтисненням нехтуємо та вважаємо, що гiпотеза про жорстку нормаль справджується. Нормальнi  $\sigma_x$  та дотичнi  $\tau_{xy}$  напруження в поперечному перерiзi дiлянки з покриттям представимо iх iнтегральними статичними еквiвалентами – вiдповiдно  $N$  та  $M_x$ , якi вважаємо вiдомими. Також вважаємо, що властивостi матерiалiв однорiдних областей повнiстю визначаються модулями Юнга  $E_i$ , модулями зсуву  $G_i$  та межами текучостi  $\sigma_{Ti}$ ,  $\tau_{Ti}$  чи мiцності  $\sigma_{Mi}$ ,  $\tau_{Mi}$ . Для внутрiшнього шару (основи) прийемо позначку  $i = 1$ , для прошарку –  $i = 2$  та для зовнiшнього шару –  $i = 3$ , площу поперечного перерiзу  $i$ -го шару позначитимемо  $F_i$ , а його полярний момент iнерцiї  $J_{pi}$ .

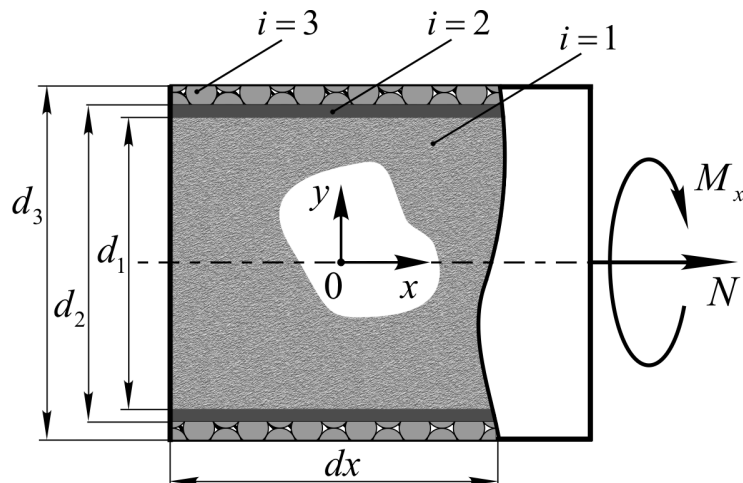


Рис. 1 – Розрахункова модель зразка

За розтягу осьова сила розподiлиться мiж областями зразка нерiвномiрно:

$$N = \sum_{i=1}^{n=3} N_i = \sum_{i=1}^{n=3} \int_{F_i} \sigma_{xi} dF_i \quad (1)$$

Умову сумісності деформацій різних шарів матеріалів із урахуванням фізичних співвідношень подамо в такому вигляді

$$\frac{\sigma_{xi}}{E_i} = \frac{\sigma_{x(i+1)}}{E_{i+1}}, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Розв'язуючи разом (1) і (2) та враховуючи гіпотезу плоских перерізів, одержимо значення нормальних напружень у кожному шарі матеріалу стержня

$$\sigma_{xk} = \frac{N}{F_k} \frac{E_k F_k}{\sum_{i=1}^{n=3} E_i F_i}, \quad k = 1, 2, 3$$

або детальніше для шару керамічного покриття

$$\sigma_{x3} = \frac{4N}{\pi \left( d_3^2 [1 - \psi^2] + \frac{E_1}{E_3} d_1^2 + \frac{E_2}{E_3} d_2^2 [1 - \zeta^2] \right)}, \quad (3)$$

де  $\zeta = d_1/d_2$ ,  $\psi = d_2/d_3$ .

Аналогічно, під час кручення матимемо

$$\tau_{xyk}(\rho) = \frac{M_x \rho}{J_{\rho k}} \frac{G_k J_{\rho k}}{\sum_{i=1}^{n=3} G_i J_{\rho i}}, \quad k = 1, 2, 3$$

зокрема в керамічному покритті

$$\tau_{xy3}(\rho) = \frac{32 M_x \rho}{\pi \left( d_3^4 [1 - \psi^4] + \frac{G_1}{G_3} d_1^4 + \frac{G_2}{G_3} d_2^4 [1 - \zeta^4] \right)}, \quad \frac{d_2}{2} \leq \rho \leq \frac{d_3}{2} \quad (4)$$

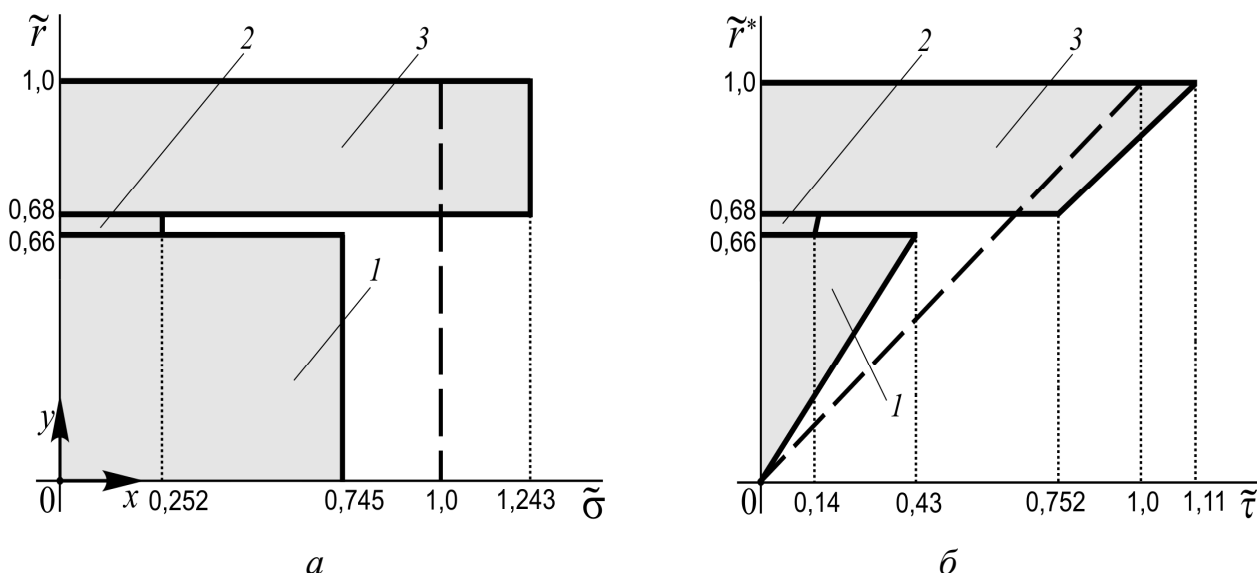
де  $\rho$  – полярна координата.

Отримані вирази показують, що напруження  $\sigma_x$  та  $\tau_{xy}$  в розглянутому стержні з двошаровим покриттям розподілені пропорційно до інтегральних жорсткостей відповідно на розтяг та кручення кожного шару.

Проілюструємо одержаний результат. Композиція матеріалів вкритого стержня є такою, що виконуються умови  $E_3 > E_1 > E_2$  та  $G_3 > G_1 > G_2$ . Модулі пружності та модулі зсуву основного матеріалу, прошарку та верхнього шару покриття відповідно:  $E_1 = 210$  ГПа,  $G_1 = 80$  ГПа,  $E_2 = 71$  ГПа,  $G_2 = 26$  ГПа,  $E_3 = 350$  ГПа,  $G_3 = 135$  ГПа. Характерні діаметри попереччя стержня (рис. 1):  $d_1 = 3,3$  мм;  $d_2 = 3,4$  мм;  $d_3 = 5,0$  мм. Введемо безрозмірні величини  $\tilde{\sigma} = \sigma_{xk} / \sigma_0$ ,  $\tilde{r} = 2y / d_3$ ,

$$\tilde{\tau} = \tau_{xyk} / \tau_0, \quad \tilde{r}^* = 2\rho / d_3, \quad \text{де номінальні напруження } \sigma_0 = N / \sum_{i=1}^{n=3} F_i,$$

$\tau_0 = 16M_x / \pi d_3^3$ . На рис. 2 суцільними лініями подано схеми розподілу абсолютних значень нормальних та дотичних напружень у матеріалі шаруватого зразка під час розтягування (рис. 2, а) та кручення (рис. 2, б).



**Рис. 2 – Напружений стан шаруватого зразка за розтягу та кручення:**  
1 – основа зразка сталь 40Х, 2 – прошарок Al, 3 – керамічне покриття Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Штриховою лінією показано розподіл напружень у стержні без покриття. Аналіз результатів досліджень свідчить, що напруження при переході від шару до шару змінюються стрибкоподібно. Що жорсткіший матеріал шару композиції, то більші напруження у ньому виникають, зокрема в твердому покритті напруження від розтягу на 24%, а від кручення на 11% перевищують значення номінальних напружень.

## Література

1. Davis, J.R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance / J.R. Davis // ASM Inter. IOM Communicat. – 2001. – 328 p.
2. Gao, W. Developments in High-Temperature Corrosion and Protection of Materials / W. Gao, Z. Li. – Woodhead Pub. ; Maney Pub. ; CRC Press, Cambridge, England, 2008. – 658 p.
3. Saji, V.S. Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials. Series in Metals and Surface Engineering / V.S. Saji, R. Cook. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – 417 p.

4. Ropyak, L. Design of a Two-Layer Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / L. Ropyak, T. Shihab, A. Velychkovych, O. Dubei, T. Tutko, V. Bilinskyi / *Progress in Physics of Metals*. – 2023. – 24 (2). P. 319–365.

5. Gere, J. *Mechanics of materials* / J. Gere, B. Goodno. – Stamford: Cengage Learning, 2012.

6. Ropyak, L.Y. Analytical study of “crosshead-slide rail” wear effect on pump rod stress state / L.Y. Ropyak, A.S. Velychkovych, V.S. Vytvytskyi, M.V. Shovkoplia / [J. of Physics: Conf. Series](#). – 2021. – 1741. – 12039.

*Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Кравчук А.В.*

Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

## **ГАРЯЧЕПРЕСОВАНА КЕРАМІКА ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК**

Серед сучасних матеріалів важлива роль кераміки обумовлена широким діапазоном її фізичних та хімічних властивостей. Багатофункціональність кераміки дає можливість її використання у різних сферах діяльності – від техніки до медицини.

Гетерофазну структуру на основі карбіду бору отримували шляхом введення в склад вихідної шихти компонентів іншої фази, що є ефективним способом підвищення міцності і тріщиностійкості кераміки. В таких матеріалах реалізується декілька механізмів збільшення в'язкості руйнування за рахунок зміни в характері поширення тріщини, обумовленої присутністю другої фази.

В експериментах по отриманню гетерофазної кераміки на основі порошків В<sub>4</sub>С використовували порошки технічного карбіду бору. Виконані рентгенівські дослідження вмісту вуглецю в порошках В<sub>4</sub>С у вільному та зв'язаному стані, які свідчать, що вміст вуглецю у вільному стані може сягати 5% мас., а зв'язаного – 21,5% ат. Нами було встановлено, що хімічний склад партії карбіду бору відрізняється, як загальним вмістом вуглецю в широкому діапазоні, так і у вільному стані. Проведений цикл експериментальних робіт по відпрацюванню

процесу диспергування порошків  $B_4C$  до мікронного розміру показав, що застосування планетарного млина найбільш ефективно впродовж перших двох годин процесу.

Вибрано склад шихти для отримання кераміки на основі карбиду бору. В якості активуючої процес спікання добавки застосовували оксиди  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  та  $Cr_2O_3$ , які як домішки вводили в склад шихти до 30% об, при цьому, оптимальною є кількість не більше 15% об. Процес гарячого пресування здійснювали на установці СПД-120 в графітових пресформах при питомому тиску  $p = 20\text{--}25$  МПа в діапазоні температур 1800–2100 °С і тривалості ізотермічної витримки 15 хв. В процесі реакційного спікання під тиском в результаті взаємодії між карбідом бору, оксидами і вуглецем утворювались керамічні матеріали складу  $B_4C\text{-}TiB_2$ ,  $B_4C\text{-}ZrB_2$ ,  $B_4C\text{-}CrB_2$ .

Досліджені структура та деякі фізико-механічні властивості зразків кераміки на основі чистого  $B_4C$  та гетерофазного складу показали, що однофазна кераміка на основі карбиду бору має неоднорідну пористу структуру, що обумовлено нерівномірним ростом зерен в процесі збиральної рекристалізації, і має порівняно низькі показники тріщиностійкості ( $K_{1C} = 3,0\text{--}3,6$  МПа·м<sup>1/2</sup>) та міцності ( $\sigma_{зг} = 300\text{--}360$  МПа), в той час як гетерофазна кераміка характеризується коефіцієнтом тріщиностійкості  $K_{1C} = 5,1\text{--}5,8$  МПа·м<sup>1/2</sup> і міцності  $\sigma_{зг} = 600\text{--}700$  МПа.

Оптимізовано склад та технологічні умови отримання кераміки поліфункціонального призначення на основі тугоплавких карбідів.

Знайдено оптимальний набір перерахованих вище добавок, що активують процес формування керамічного матеріалу з однорідною дрібнозеренною структурою і рівномірним розподілом фаз, який забезпечує отримання необхідних фізико-механічних та експлуатаційних характеристик композиційного матеріалу в залежності від його призначення.

*Нові напрямки отримання високоміцної кераміки на основі карбиду бору для броньового захисту.*

Карбід бору застосовується для виготовлення шліфувальних та захисних пластин для бронежилетів.

Жорсткий, спрямований ковалентний зв'язок у карбіді бору і, як наслідок, низька пластичність і високий опір ковзання по межах зерен аж до температур близьких до температури плавлення, при яких спостерігається сублімація карбиду бору, створюють виняткові труднощі при виготовленні матеріалів на основі карбиду бору. Як правило, це матеріали, отримані спіканням або гарячим пресуванням із застосу-

ванням різних добавок, що активують. Систематичне дослідження процесів гарячого пресування порошків чистого та технічного карбїду бору (метод вуглетермічного відновлення в дуговій печі) показало, що інтенсивне ущільнення пресувань відбувається у дуже вузькій області передплавильних температур (0,8–0,9  $T_{пл}$ ). При цьому основним механізмом перенесення маси слід вважати механізм активованого ковзання по межах зерен, що забезпечує ущільнення (80-90%) у початковий період ізотермічної витримки через анігіляцію. Подальше ущільнення протікає шляхом об'ємної самодифузії. При надзвичайно розвиненій сітці кордонів у разі використання дисперсних порошків з великою кількістю дефектів, створених подрїбненням, ці процеси активуються.

Як показали дослідження, порошки з розміром більше 8 мкм практично не спікаються, а при розмірі частинок менше 2 мкм можна отримувати вироби з пористістю 1%. У цьому відношенні перспективним є використання ультрадисперсних порошків, отриманих методом резонансно-вихрового подрїбнення.

Для отримання високоміцної кераміки на основі карбїду бору необхідні порошки високої дисперсності оскільки за даними досліджень при розмірі частинок більше 8 мкм вони не спікаються. Тому пошук шляхів одержання ультрадисперсних порошків є актуальним.

Отримання високоміцної кераміки на основі карбїду бору ефективно при застосуванні високодисперсних порошків карбїду бору отримуваних методом резонансно-вихрового помолу.

Головною відмінністю резонансно-вихрового методу помолу є те, що в розробленій установці для реалізації процесу отримання порошків високотвердих матеріалів подрїбнення за допомогою вказаного методу, в робочій камері відсутні механічні деталі, що обертаються і труться, тому при подрїбненні матеріалів практично немає зносу матеріалу камери і «намолу» сторонніх добавок. Використання установки забезпечує отримання чистих подрїбнених порошків нанодисперсного діапазону для формування гарячепресованої кераміки з дрібнокристалічною зеренною структурою та підвищеними фізико-механічними характеристиками.

## **НОВІ НАПРЯМКИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ КАРБІДУ БОРУ ДЛЯ БРОНЬОВОГО ЗАХИСТУ**

Карбід бору має широкий спектр застосування, в тому числі й для виготовлення захисних пластин бронезилетів.

Жорсткий, спрямований ковалентний зв'язок в карбіді бору і, як наслідок, низька пластичність та високий опір ковзанню по межах зерен, аж до температур близьких до температури плавлення, при яких спостерігається сублімація карбіду бору, створюють виняткові труднощі при виготовленні матеріалів на основі карбіду бору. Як правило, це матеріали, отримані спіканням або гарячим пресуванням із застосуванням різних активуючих добавок. Систематичне дослідження процесів гарячого пресування порошків чистого та технічного карбіду бору (метод вуглетермічного відновлення в дуговій печі) показало, що інтенсивне ущільнення зразків відбувається у дуже вузькій області передплавильних температур ( $0,8-0,9 T_{пл}$ ). При цьому основним механізмом перенесення маси слід вважати механізм активованого ковзання по межах зерен, що забезпечує ущільнення (80–90%) у початковий період ізотермічної витримки через анігіляцію. Подальше ущільнення протікає шляхом об'ємної самодифузії. При надзвичайно розвиненій сітці кордонів у разі використання дисперсних порошків з великою кількістю дефектів, створених подрібненням, ці процеси активуються.

Як показали дослідження, порошки з розміром більше 8 мкм практично не спікаються, а при розмірі частинок менше 2 мкм можна отримувати вироби з пористістю 1%. Тому пошук шляхів одержання ультрадисперсних порошків є актуальним. У цьому відношенні перспективним є використання ультрадисперсних порошків, отриманих методом резонансно-вихрового подрібнення.

Головною відмінністю резонансно-вихрового методу є те, що в розробленій установці для реалізації процесу отримання порошків високотвердих матеріалів подрібненням за допомогою вказаного методу, в робочій камері відсутні механічні деталі, що обертаються і труться, тому при подрібненні матеріалів практично немає зносу матеріалу камери і «намолу» сторонніх домішок. Використання установки забезпечує отримання чистих подрібнених порошків нанодисперсного ді-

пазону для формування гарячепресованої кераміки з дрібнокристалічною зеренною структурою та підвищеними фізико-механічними характеристиками.

*Волошина Л.В., Харченко Б-А.О.* Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## **ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ В УКРАЇНІ**

В сучасних умовах функціонування національної мережі єдиного часу важливо забезпечити високоточну синхронізацію часу для різних галузей промисловості, транспорту, телекомунікацій та енергетики. Це завдання стає особливо актуальним з урахуванням впровадження сучасних технологій синхронізації часу в корпоративних мережах. Впровадження нових технологій дозволяє забезпечити підвищену точність і стабільність синхронізації, що є критично важливим для забезпечення надійності і ефективності роботи різних систем [1].

Основні напрямки досліджень в області синхронізації часу охоплюють технології GNSS, IEEE 1588 та їх вплив на підвищення точності синхронізації в мережах. Аналіз сучасних технологій показує переваги та недоліки різних підходів до синхронізації. Технологія GNSS (Global Navigation Satellite System) використовується для забезпечення високоточної синхронізації часу шляхом використання сигналів супутникових навігаційних систем. Вона забезпечує високу точність, але має залежність від умов прийому сигналу, що може впливати на стабільність синхронізації [2].

Технологія IEEE 1588, відома як Precision Time Protocol (PTP), дозволяє забезпечити високу точність синхронізації часу в локальних мережах. Ця технологія широко використовується в корпоративних мережах і має значні переваги у порівнянні з традиційними методами синхронізації. Для досягнення мети дослідження було проведено серію експериментів з використанням різних технологій синхронізації часу. Основна увага приділялась аналізу точності та стабільності синхронізації в різних умовах експлуатації. Використовувались такі інструменти як моделювання, аналіз даних та порівняльні випробування.

Результати досліджень показали, що використання технології IEEE 1588 дозволяє забезпечити високу точність і стабільність синхронізації часу в національній мережі єдиного часу. У порівнянні з традиційними методами, ця технологія забезпечує кращі результати в умовах високої завантаженості мережі та змінних умов експлуатації. Результати роботи підтверджують ефективність використання сучасних технологій синхронізації часу для модернізації національної мережі єдиного часу. Запропоновані рішення дозволяють підвищити точність і стабільність синхронізації, що є критично важливим для забезпечення надійності роботи різних систем.

Для забезпечення точності синхронізації часу в Україні необхідно враховувати декілька основних аспектів. По-перше, слід продовжувати вдосконалювати інфраструктуру для прийому і обробки сигналів GNSS. Це включає встановлення більшої кількості приймачів і передавачів, а також модернізацію існуючого обладнання. По-друге, важливо впроваджувати технології PTP (Precision Time Protocol) у великих корпоративних мережах та інфраструктурних проектах. PTP дозволяє досягати високої точності синхронізації часу за допомогою локальних мереж, що є ключовим для багатьох галузей, включаючи телекомунікації, енергетику та транспорт [1, 2].

Крім того, слід звернути увагу на розвиток та впровадження систем резервування часу. Це означає, що окрім основної системи синхронізації, має бути альтернативна система, яка може взяти на себе функції синхронізації у разі збою або недоступності основної системи. Такий підхід дозволить забезпечити безперервність та надійність роботи мережі єдиного часу. Важливим є також питання навчання і підготовки фахівців у сфері синхронізації часу. Необхідно проводити регулярні тренінги та курси підвищення кваліфікації для інженерів і технічного персоналу, що працює з системами синхронізації. Це забезпечить високий рівень знань та навичок, необхідних для ефективної експлуатації та обслуговування систем синхронізації часу.

Таким чином, для забезпечення високої точності синхронізації часу в Україні необхідно комплексно підходити до модернізації національної мережі єдиного часу. Це включає впровадження сучасних технологій, розвиток інфраструктури, створення систем резервування та підготовку кваліфікованих фахівців. Лише такий підхід дозволить забезпечити надійність та ефективність функціонування національної мережі єдиного часу, що є критично важливим для розвитку багатьох галузей промисловості, транспорту, телекомунікацій та енергетики.

## Література

1. Солдатов, В.В. Служба єдиного часу і еталонних частот України. Синхронізація часу з використанням Інтернет протоколів NTP і RTP : стан та перспективи розвитку / В.В. Солдатов // Український метрологічний журнал. – 2019. – № 3. – С. 23–29.

2. Матвієнко, М.В. Особливості модернізації національної мережі єдиного часу з урахуванням досвіду впровадження сучасних технологій синхронізації часу в корпоративних мережах / М.В. Матвієнко, В.А. Гайдаманчук, І.М. Пастушенко // Український метрологічний журнал. – 2019. – № 1. – С. 12–18.

*Геворкян Е.С., Комарова Г.Л., Мартиросян С.Р.*  
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## **ОТРИМАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ КЕРАМІКИ З УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ВИСОКОТВЕРДИХ СПЛАВІВ**

Основою численних видів інструментальної кераміки є оксид алюмінію. Поряд з перевагами (висока твердість, особливо при підвищених температурах, хімічна інертність і, відповідно, висока зносостійкість, необмежені сировинні ресурси) оксидна кераміка має ряд недоліків: висока крихкість, низька стійкість до термічних та механічних ударів. Незважаючи на це матеріали на основі оксиду алюмінію знайшли застосування як ріжучий інструмент для обробки високоміцних сплавів металів та інших матеріалів, що важко обробляються.

Застосування гарячого пресування при отриманні оксидної кераміки дозволяє знизити температуру спікання та отримати матеріал із щільністю, близькою до теоретичної. Так, з глинозему різних марок без добавок і з добавкою 0,2–0,4% MgO при тиску 50 МПа і температурах 1600–700 °С можуть бути отримані зразки з щільністю 98,5–99,5%. Така щільність при звичайному спіканні досягається лише за нормальної температури 1800–1900 °С.

Спікання оксиду алюмінію є досить вивченим процесом. Воно відбувається під впливом наступних механізмів масопереносу: в'язкої течії, пластичної деформації, випаровування-конденсації, об'ємної, зе-

рнограничної та поверхневої дифузії. При гарячому пресуванні основними механізмами ущільнення кераміки на кінцевому етапі є пластична деформація і дифузія.

Режим спікання дуже впливає на кінцеві властивості кераміки. Оптимальна температура спікання кераміки залежить від дисперсності вихідного порошку, наявності в ньому домішок, добавок та тривалості нагрівання. Так, при розмірі зерен порошку 0,5–1,0 мкм спікання пластин оксидної кераміки проводять при 1710 °С протягом 5–10 хв. При збільшенні температури 1780–1820 °С витримка може бути скорочена до 1–2 хв. Встановлено, що оптимальними є нетривалі витримки за високих температур [1].

Структура інструментальної кераміки має наступні властивості: висока щільність матеріалу, міцність міжфазних і міжзеренних меж, висока дисперсність і рівномірність розподілу структурних складових, мінімальний розмір дефектів, які можуть бути джерелом руйнування, відсутність легкоплавких складових, що знижують високотемпературну міцність, висока твердість і опір. Механічні характеристики оксидної кераміки прямо пов'язані із середнім розміром зерна у матеріалі. Введення в оксид алюмінію 15–30% карбідів (TiC, WC, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, Mo<sub>2</sub>C) дозволяє підвищити механічні характеристики за рахунок ще більшого подрібнення структури.

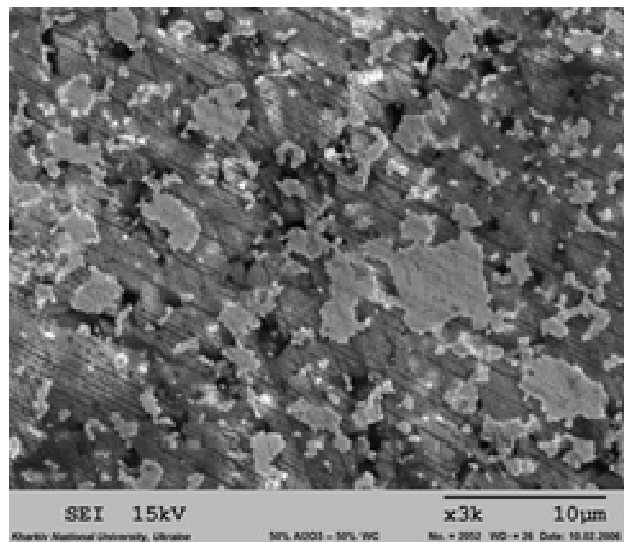
У інструментах, що випускаються промисловістю, найчастіше використовується карбід титану. Дані порівняльного дослідження кінетики зростання зерен оксиду алюмінію з добавками MgO (0,6%) та TiC (30%) показали, що введення обох добавок скорочує зростання зерна при гарячому пресуванні [2]. Керамічний матеріал характеризується ковалентним або іонними зв'язками; він важко піддається деформації через сильні взаємні зв'язки між атомами. При прикладенні напруги вище за межу міцності в кераміці майже без деформації виникає крихке руйнування.

Для забезпечення надійності керамічних матеріалів необхідно зменшити кількість показників якості виробів. Зокрема, для кераміки, що використовується як машинобудівний матеріал, надійність підвищують шляхом зменшення розкиду міцності. Цей розкид також тісно пов'язаний з наявністю пор та тріщин у матеріалі [3]. Тому для зниження крихкості та отримання машинобудівної кераміки з високою надійністю необхідно виключити навіть дрібну пористість, що викликається попаданням пилу з повітря, на що не звертали уваги при виготовленні кераміки традиційними способами.

При виробництві машинобудівної кераміки, нехай навіть при використанні однакових з традиційними процесів формування та спікання, слід на основі строго контрольованого процесу виробництва уникати утворення тріщин і залишкових напруг, що виникають в результаті утворення дрібних пор внаслідок перемішування сторонніх тіл (пластифікуючих добавок) при формуванні та усадкових явищ, при сушінні та випаленні. Одночасно з цим слід зводити до мінімуму кількість дислокацій, що залишаються в обпалених виробках, забезпечуючи їх більш рівномірний розподіл [4].

З цієї точки зору метод гарячого пресування прямим пропусканням струму викликає значний інтерес, оскільки формування проходить без використання будь-яких пластифікуючих добавок і з мінімальним градієнтом температур по перерізу графітової форми. Завдяки дуже швидкому нагріванню не росте зерно та зберігається тонка мікроструктура.

Для виготовлення пластин використовувалися порошки окису алюмінію  $Al_2O_3$  дисперсністю 0,06 мкм і вольфраму моно карбиду дисперсністю 0,07 мкм, отриманим плазмохімічним методом. Мікроструктура композита  $Al_2O_3 - 50 \text{ мас.}\% \text{ WC}$  представлено на рис. 1.



**Рис. 1 – Мікроструктура окисно-карбідної кераміки  $Al_2O_3 - 50 \text{ мас.}\% \text{ WC}$**

Проведені дослідження показали, що для отримання ріжучих пластин  $Al_2O_3 - 50 \text{ мас.}\% \text{ WC}$  з високими функціональними можливостями необхідно оптимізувати співвідношення фазових складових вихідних порошків та їх гомогенізації в процесі змішування, провести формування методом гарячого вакуумного пресування при оптимальних режимах, провести полірування ріжучих пластин, оптимізувати параметри різання

при обробці різних металів і сплавів. В такому випадку можливо суттєво підвищити якість обробленої поверхні високотвердих сталей та сплавів, які використовуються на залізничному транспорті.

### **Література**

1. Upadhyaya, G.S. Materials science of cemented carbides — an overview / G.S. Upadhyaya // *Mat. Des.* – 2001. – 22. – P. 483–489.
2. Oh, S.J. Mechanical properties and rapid consolidation of nanostructured WC and WC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites by high-frequency induction-heated sintering / S.J. Oh, B.S. Kim, I.J. Shon // *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* – 2016. – 58. – P. 189–195.
3. Jelitto, H. Fracture toughness of porous materials e Experimental methods and data / H. Jelitto, G.A. Schneider // *Data Brief.* – 2019. – 23. – 103709.
4. Bull, S.J. An explanation of the indentation size effect in ceramics / S.J. Bull, T.F. Page, E.H. Yoffe // *Phil. Mag. Lett.* – 1989. – 59. – P. 281–288.

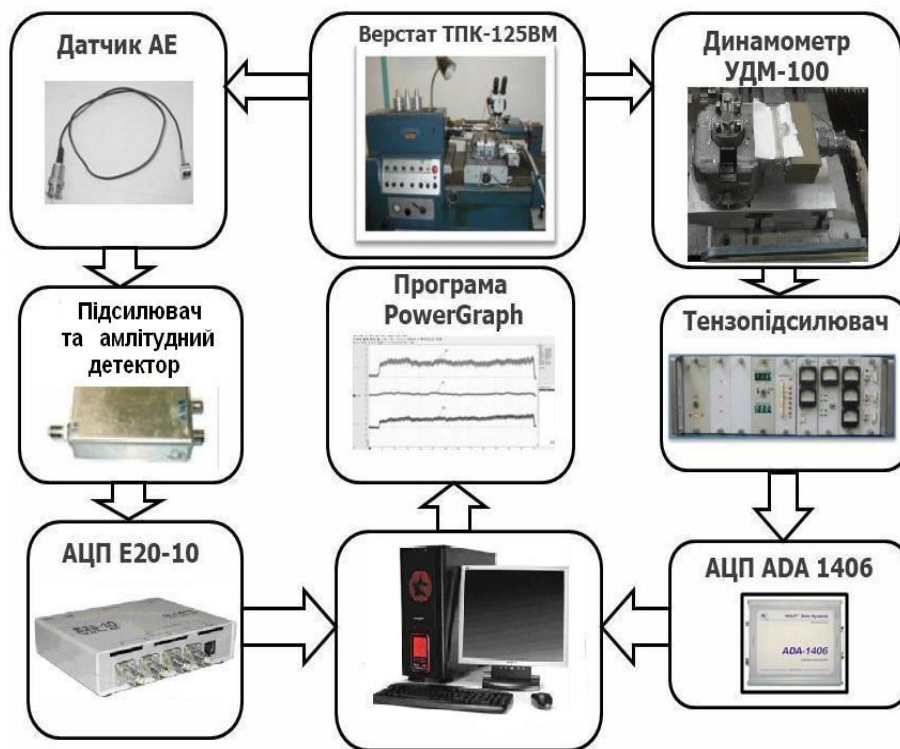
*Девін Л.М., Ричев С.В., Нечипоренко В.М.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
*Даніленко І.І.* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## **ТОНКЕ КОСОКУТНЕ ТОЧІННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д20 МОНОКРИСТАЛОМ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ**

Різці з природних та синтетичних монокристалів алмазу активно застосовуються для механічної обробки оптичних деталей з пластичних кольорових металів, одним з яких є алюмінієвий сплав Д20. Головна перевага – це забезпечення вимог по якості (шорсткості) поверхні при обробці, яких неможливо досягти використовуючи інші надтверді матеріали [1]. В даній роботі визначався вплив кута нахилу різальної кромки  $\lambda$  на складові сили різання, сигнал акустичної емісії (АЕ) та шорсткість обробленої поверхні при точінні синтетичним монокристалічним різцем. Моделювання процесу алмазного точіння проводили

на автоматизованому стенді на базі токарного верстата з ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [2].

Складові сили різання в процесі оброки по торцю заготовки вимірювали за допомогою динамометра УДМ-100. Сигнали від динамометра по трьох каналах через підсилювач надходили на АЦП ADA-1406. Управління АЦП ADA-1406 здійснювалося програмою Power Graph [3]. Для кожного виконаного дослідження проводили обробку даних, яка включала корекцію даних (виключення похибок вимірювань). Структурно-функціональна схема автоматизованої системи дослідження процесу тонкого алмазного точіння та сигналів акустичної емісії наведена на рис. 1.

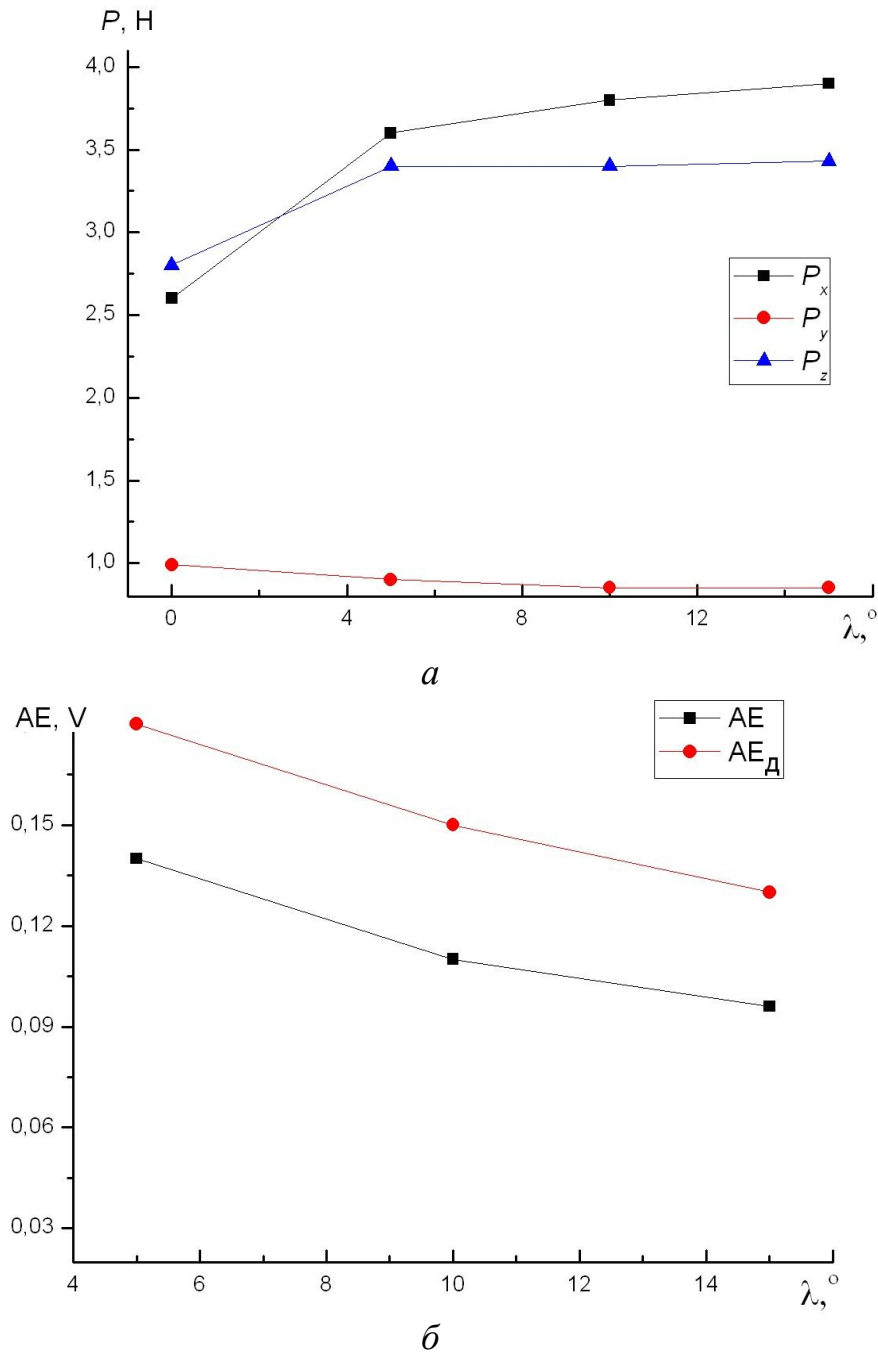


**Рис. 1 – Структурно-функціональна схема автоматизованої системи дослідження процесу тонкого алмазного точіння та сигналів акустичної емісії**

Для запису на комп'ютер сигналу АЕ в діапазоні від 200 кГц до 2 МГц використовували АЦП Е20-10 фірми L-Card, що керувався програмою «PowerGraph». Програма дозволила проводити статистичну обробку даних, кореляційний і спектральний аналіз [4]. В якості різальної пластини використовували вставку з монокристалом синтетичного алмазу ( $r_b = 2,25$  мм;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\alpha = 1,5^\circ$ ).

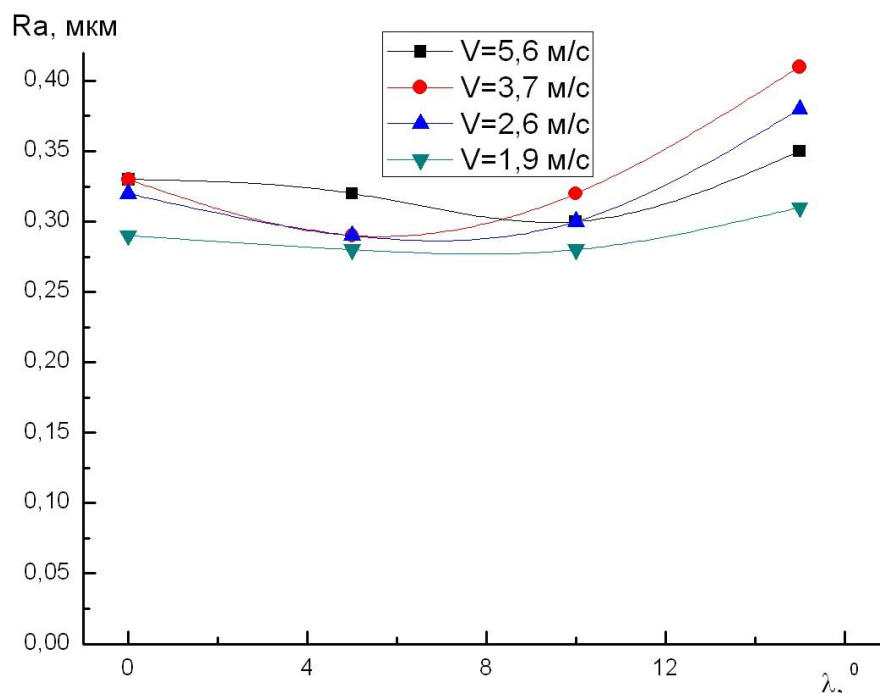
Як видно з результатів дослідження (рис. 2), складові сили різання (рис. 2, а)  $P_x$ ,  $P_z$  збільшуються в діапазоні зміни кута нахилу ріжучої кромки від  $0^\circ$  до  $5^\circ$ , це може бути пов'язано зі зменшенням заднього

кінематичного кута  $i$ , як наслідок, збільшення напружень на задній поверхні, при подальшому збільшенні кута нахилу  $\lambda$  складові  $P_x$ ,  $P_z$  майже не збільшуються. Складова  $P_y$  в процесі збільшення кута нахилу ріжучої кромки навпаки, зменшувалася. Сигнал акустичної емісії (АЕ) (рис. 2, б) зменшувався у всьому діапазоні збільшення кута нахилу  $\lambda$  від  $0^\circ$  до  $15^\circ$ , це може бути обумовлене більш сприятливими контактними процесами на передній гранці різця, а саме контактною зоною інструмент – стружка.



**Рис. 2 – Залежність складових сили різання (а) та сигналів акустичної емісії (АЕ – основний сигнал; АЕ<sub>д</sub> – детектований) (б) від кута нахилу різальної кромки  $\lambda$**

З рис. 3 видно, при точінні величина шорсткості  $Ra$  зменшується зі збільшенням кута нахилу різальної кромки в діапазоні від  $0^\circ$  до  $10^\circ$ , особливо при швидкостях різання  $> 3,7$  м/с. Зменшення шорсткості відбувається за рахунок зміни кінематичного радіуса округлення різальної кромки  $\rho$ . Це обумовлено інтенсифікацією пластичних процесів на задній поверхні і, так званім, процесом вигладжування. Подальше збільшення кута нахилу призводить до погіршення якості обробки, це може бути спричинено інтенсифікацією вібраційних процесів, пов'язаних з мінімізацією впливу на них від зменшення співвідношення довжини активної довжини різальної кромки до середньої товщини зрізу при збільшенні кута нахилу на фоні вібрацій, пов'язаних з подачею.



**Рис. 3 – Залежність шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  від кута нахилу різальної кромки  $\lambda$**

Як видно з результатів дослідження, косокутне алмазне точіння можна ефективно використовувати з кутами нахилу різальної кромки в межах від  $5^\circ$  до  $10^\circ$  при обробці алюмінієвого сплаву Д20. Це призводить до зменшення сигналу акустичної емісії, шорсткості обробленої поверхні, за рахунок зменшення вібрацій в системі, а також зміни кінематичного радіуса округлення різальної кромки  $\rho$ . Збільшення кута нахилу  $\lambda > 10^\circ$  не ефективно в зв'язку з погіршенням якості обробленої поверхні, за рахунок інтенсифікації впливу подачі на фоні інших факторів при обробці.

## Література

1. Несмелов, А.Ф. Алмазные инструменты в промышленности / А.Ф. Несмелов. – М. : Машиностроение, 1964 – 277 с.
2. Девин, Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента / Л.Н. Девин. – К. : Наукова думка, 1992. – 131 с.
3. Девин, Л.Н. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания / Л.Н. Девин, А.Г. Сулима // Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД). 2008. – №3. – С. 24–26.
4. Девин, Л.Н. Автоматизированная система для измерения сигнала акустической эмиссии в процессе прецизионного алмазного точения / Л.Н. Девин, Н.Е. Стахнив, А.Г. Сулима // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : мат. 11-го Международ. науч.-техн. семинара, г. Свалява. 21–25 февраля 2011г. – К. : АТМ України, 2011. – С.79–81.

*Драченко М.П.* Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

## **ЕВОЛЮЦІЯ СХЕМ НЕІЗОЛЬОВАНИХ ПОНИЖУЮЧИХ КОНВЕРТОРІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ У ФОРМУВАЧАХ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ**

У випадках, коли є необхідність використання якісних джерел живлення для електрозварювальних технологій з великими струмами навантаження та з низьким рівнем пульсцій вихідного струму і швидких перехідних процесах, виникає питання підвищення якості джерел живлення на апаратному рівні. Як приклад, можна розглянути варіант багатофазних перетворювачів напруги електричного струму [4].

Енергоспоживання зварювального обладнання нерівномірне і характеризується сплесками струму споживання та навантаження, також можливі і коливання динамічного навантаження до 500 а/мс при перехідних процесах. При струмах споживання до 400 А добре працюють однофазні перетворювачі [1, 2], але із зростанням струмів споживання зменшується їх ефективність, і проблемою стає розсіювання потужності втрат. Також, характеристика перехідного процесу залежить від комутаційної частоти, але при її підвищенні зменшується ефективність у зв'язку з зростанням комутаційних втрат.

У сучасності, традиційні однофазні рішення [3] перестали відповідати вимогам сучасних характеристик джерел живлення. Тому у деяких випадках застосовуються багатофазні знижуючі перетворювачі напруги [4], які мають декілька переваг над стандартними конфігураціями. До цих переваг належить більш висока ефективність в усьому діапазоні зміни параметрів, зменшений рівень пульсацій вихідного струму, і краща характеристика перехідного процесу.

Багатофазні регулятори використовують однакові методи ШІМ керування, як і однофазні пристрої. Керування силовими ключами здійснюється комплементарно із заданим коефіцієнтом заповнення  $D$  на основі співвідношення між вхідною і вихідною напругою. Додаткові переваги багатофазного перетворювача полягають у гнучкій зміні фазових конфігурацій, що дозволяє оптимізувати ефективність у широкому діапазоні струмового навантаження.

У багатофазного регулятора є кілька переваг над однофазною схемою: менше вхідні ємності, краща теплова характеристика та ефективність при роботі з різними навантаженнями та у перехідних процесах.

Використання декількох фаз зменшує середньоквадратичний вхідний струм через конденсатори, що розв'язують, і тому зменшує пульсацію напруги на вході. порівняно з однофазною схемою, у сумарного вхідного сигналу струму багатофазного понижуючого регулятора менше пікове значення та середньоквадратичний струм. в результаті не лише пом'якшуються вимоги до вхідного конденсатора, а й зменшується навантаження на ключі комутаторів каскадів. Крім того, спрощується вибір силового транзистора завдяки ширшому ряду доступних компонентів.

У кожному каскаді багатофазного регулятора тече той самий струм пульсації, що у еквівалентної однофазної схеми, однак, оскільки каскади підключені до загального вихідного вузла, їх струми індуктивностей підсумовуються. Ця робота у паралельному режимі дозволяє зменшити сумарний струм пульсацій. На рис. 1 показано, як гаситься струм пульсацій у чотирифазному перетворювачі. Розмах сигналу сумарного вихідного струму  $I_{SUM}$  менше, ніж окремо взятого фазного струму. Завдяки меншим пульсаціям вдається дотриматися вимог специфікації, теплового режиму та ефективності при високому навантаженні. Багатофазний перетворювач розподіляє енергію між декількома індуктивностями та кількома силовими ключами, внаслідок чого на кожен каскад припадає порівняно менше енергії. Таким чином, забезпечується більш ефективна робота кожного каскаду.

При перехідному процесі багатофазний контролер може відключати окремі каскади для зміни фази при накиданні навантаження або повністю вимикати їх при її скиданні. Коли одночасно працює кілька каскадів, їх індуктивності працюють у паралельній конфігурації. При цьому на кожен каскад припадає індуктивність, яка в  $n$  разів менша за еквівалентну індуктивність з боку виходу, де  $n$  – загальна кількість каскадів.

Як приклад, на рис. 2 ілюструється принципова схема багатофазного знижуючого конвертора напруги з чотирьма паралельними каскадами, або фазами де вхідна напруга –  $U_{IN}$ ; вихідний струм –  $I_{OUT}$ ; вихідні індуктивності –  $L_1 - L_4$ ; вхідні конденсатори –  $C_1 - C_4$ . На цьому малюнку також показані, силові ключі  $Q_{1-4}$  в кожному каскаді. Кожна фаза включається на одній і тій же частоті, але в різний час, що залежить від кількості силових каскадів. Цій схемі чотирьохфазного перетворювача потрібно чотири комутаційні сигнали, зміщених по фазі на  $90^\circ$ .

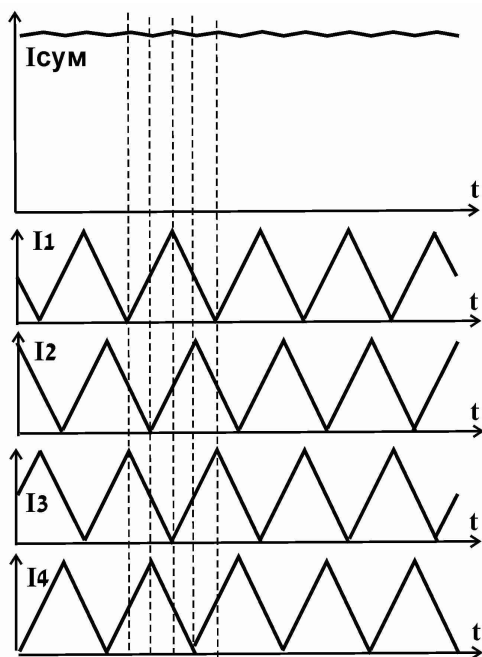


Рис. 1 – Гасіння струму пульсацій у чотирифазному перетворювачі

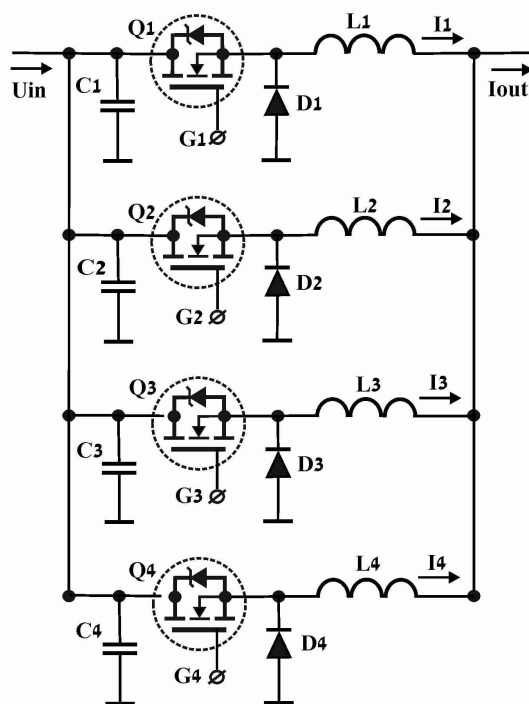


Рис. 2 – Схема багатофазного знижуючого конвертора напруги з чотирьма паралельними каскадами

Багатофазні конвертори напруги мають безліч переваг, але на шляху успішної реалізації проекту необхідно вирішити декілька завдань. Фазове керування – можливо, найскладніше з їх. Щоб забезпечити найкращі робочі характеристики схема повинна рівномірно розподілити струм між активними каскадами, придушити пульсації і зба-

лансувати теплове навантаження. Контролер повинен також швидко вмикати або вимикати каскади, щоб упоратися з навантаженням у перехідному процесі.

### Література

1. Лебедев, А.В., Транзисторные источники питания для электродуговой сварки (обзор) / А.В. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2012. – 9. – С. 34–40.
2. Володин, В.Я. Современные сварочные аппараты своими руками / В.Я. Володин. – Санкт-Петербург: Наука и техника, 2008. – 304 с.
3. [http://www.rom.by/files/teoreticheskie\\_osnovy\\_buck-konvertera.pdf](http://www.rom.by/files/teoreticheskie_osnovy_buck-konvertera.pdf)
4. <https://www.ti.com/lit/an/slva867/slva867.pdf?ts=1717963361692>.

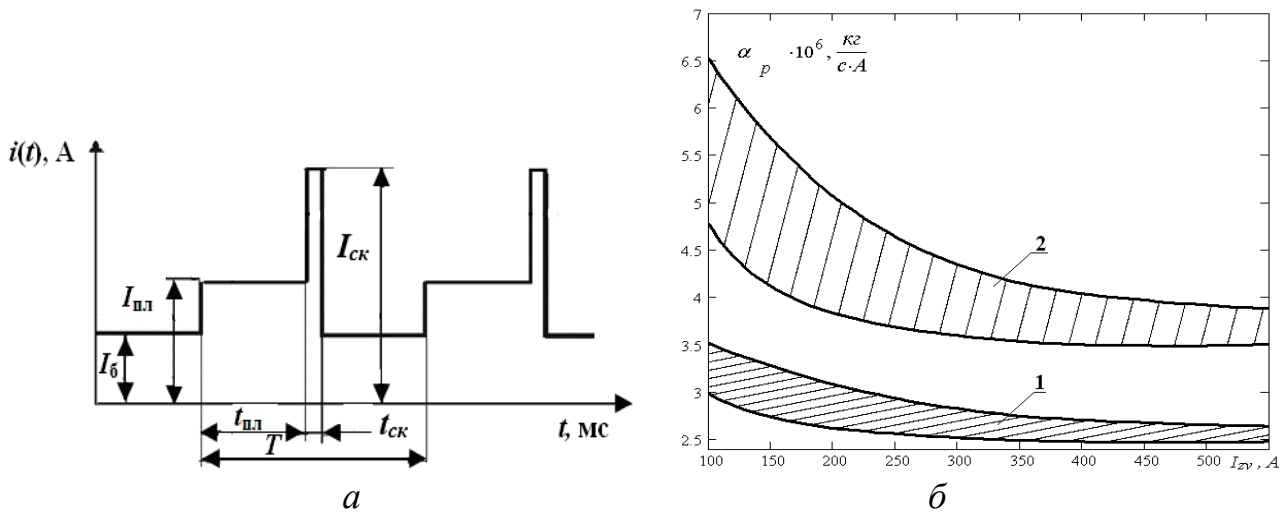
*Жерносеков А.М., Римар С.В.* Інститут  
електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Процес імпульсно-дугового зварювання (ІДЗ) в захисних газах, де реалізується принцип «один імпульс – одна крапля» («One Pulse – One Drop») [1, 2], із всіх процесів дугового зварювання характеризується дуже високою продуктивністю плавлення електрода. Плавлення металу електрода і його перенесення у ванну з розплавленим металом відбувається таким чином, що за кожний імпульс зварювального струму відбувається перенесення однієї краплі металу. При цьому цей процес проходить спокійно, без збурення, краплі розплавленого металу близькі по розмірам, мають малий діаметр, вони не деформуються, не закипають і випаровування металу з них мінімальне.

Досягти ще більшого ефекту продуктивності плавлення металу електрода вдалося при застосуванні процесу ІДЗ на зворотній полярності, який розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, зі спеціальною формою імпульсу струму [3, 4] (рис. 1, а). Перша ступінь імпульсу струму з величиною  $I_{nl}$ , тривалістю  $t_{nl}$  дозволяє розплавити заданий об'єм металу на торці електрода. Друга ступінь імпульсу струму з величиною  $I_{ck}$ , тривалістю  $t_{ck}$  дозволяє переносити краплю розплавленого металу у всіх просторових положеннях електрода. Базовий струм

$I_0$  підтримує горіння дуги, а плавне регулювання струму зварювання здійснюється частотою слідування імпульсів  $f = 1/T$ .



**Рис. 1 – Форма багаторівневого імпульсу зварювального струму (а) та області зміни коефіцієнта розплавлення  $\alpha_p$  від зварювального струму  $I_{zv}$  при зворотній полярності (б): 1 – при зварюванні постійним струмом; 2 – при ІДЗ із наявністю випаровування металу з поверхні краплі (ближче до нижніх границь) й без випаровування (ближче до верхніх границь)**

Незалежність силового й теплового впливу дозволяє підібрати такі параметри останнього, щоб забезпечити максимальний коефіцієнт розплавлення для кожного матеріалу електрода. Концепція багаторівневого імпульсу зварювального струму є перспективною, оскільки дозволяє підібрати параметри імпульсів для матеріалів із різними теплофізичними властивостями, а можливість плавного регулювання параметрів імпульсів надає можливість автоматизації процесу зварювання плавким електродом. Коефіцієнт розплавлення  $\alpha_p$  при зворотній полярності для ІДЗ більше в  $\sim 1,75$  рази при малих струмах і більше в  $\sim 1,5$  рази при більших струмах, ніж коефіцієнт розплавлення при зварюванні постійним струмом (рис. 1, б). Коефіцієнт розплавлення електрода  $\alpha_p$ ,  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{А})$ , у першому наближенні прямо пропорційний масовій швидкості плавлення  $G_p$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ , і обернено пропорційний струму зварювання  $I_{zv}$ ,  $\text{А}$ :  $\alpha_p = G_p/I_{zv}$ .

Таким чином, при ІДЗ значно зростає ефективність плавлення електрода на режимах з малим випаровуванням металу, а значить, підвищується енергетична та економічна ефективність зварювального процесу. Застосування імпульсу багаторівневої форми, що розділяє його тепловий і силовий вплив, а також використання устаткування, розробленого в ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України, дозволяє здійсню-

вати процес зварювання з мінімальним випаровуванням металу електрода для широкого класу конструкційних матеріалів.

### Література

1. Завдовєєв, А.В. Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей / А.В. Завдовєєв, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, М. Rogante, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2020. – №12. – С. 23–29.

2. Завдовєєв, А.В. Оптимізація за розрахунковим методом режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням високолегованого зварювального матеріалу / А.В. Завдовєєв, В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, А.М. Денисенко, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2021. – №4. – С. 10–15.

3. Zhernosekov, A.M. Influence of the Shape of Pulses of Welding Currents on the Properties of Joints of Aluminum Alloys / A.M. Zhernosekov, V.Ye. Fedorchuk, H.P. Kysla, V.A. Koval, Iu.V. Falchenko / Materials Science. – 2022. – Vol. 58. – P. 157–164.

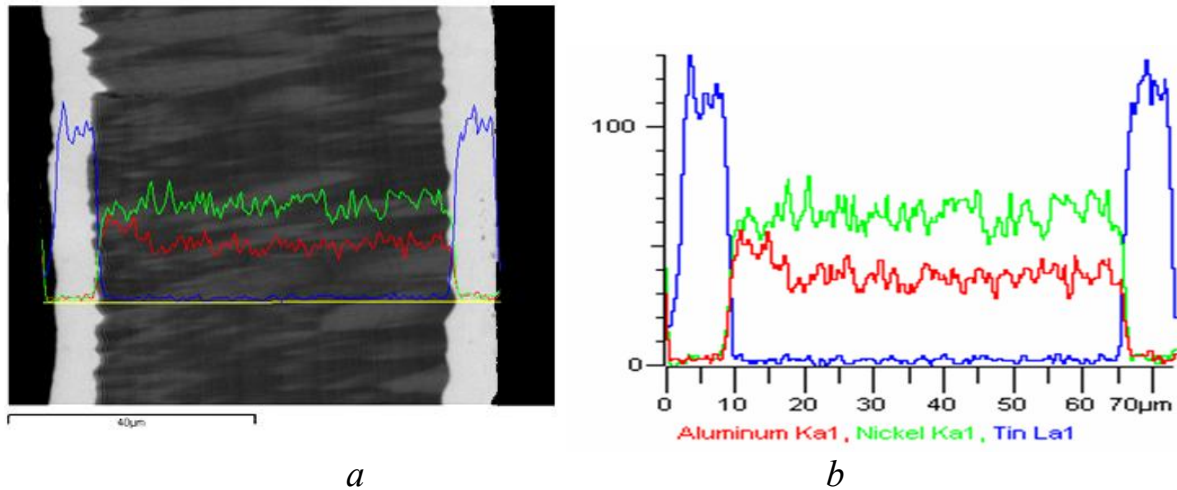
4. Жерносеков, А. Управління параметрами імпульсів струму при зварюванні плавким електродом алюмінієвих сплавів / А. Жерносеков, В. Федорчук, О. Новомлинець // Технічні науки та технології : науковий журнал. – 2022. – №2 (28). – С. 31–37.

*Ziakhor I.V., Levchuk A.M., Shylo Yu.A.,  
Koltsov V.V., Zavertannyi M.S. E.O. Paton Electric  
Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## **PRESSURE WELDING OF NICKEL SUPERALLOYS USING NANOLAYERED FOILS**

The effectiveness of application of metallic nanolayered foils (NF) produced by EB PVD method, in the processes of pressure welding of high-temperature Ni-Cr-based alloys (nickel superalloys) was studied. Previous research results were used to improve the methods of control and regulation of the parameters of the process of successive layer-by-layer deposition of reactive components, and optimize the composition and structure of metallic NF for their application in the processes of pressure welding of nickel superalloys.

Effectiveness of application of NF of Ti/Co and Ti-Ni/Al-Ti systems (Fig. 1) as an interlayer in friction welding (FW) and resistance butt welding (RBW) of dissimilar nickel superalloys, namely casting (blade) VZhL12U and wrought (disc) EI698 alloys, was studied.

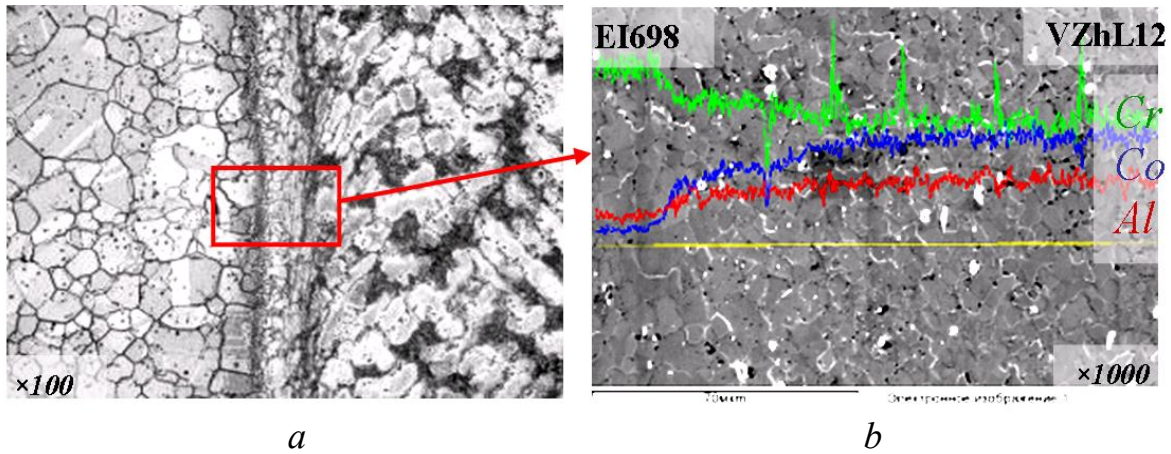


**Figure 1 – SEM-image (a) and Al, Ni, Ti distribution (b) in nanolayered foil Ti-Ni/Al-Ti**

It was found that at FW and RBW of nickel superalloys without NF application, structural and chemical heterogeneity in the form of interlayer of variable chemical composition is observed in the joint zone, as well as regions of cast structure. Negative effect of chemical heterogeneity on the mechanical properties of welded joints is due to degradation of strengthening  $\gamma'$ -phase in the interlayer metal and respective lowering of the values of the joint high-temperature strength. Presence of regions of cast structure essentially reduces cracking resistance of the joint metal.

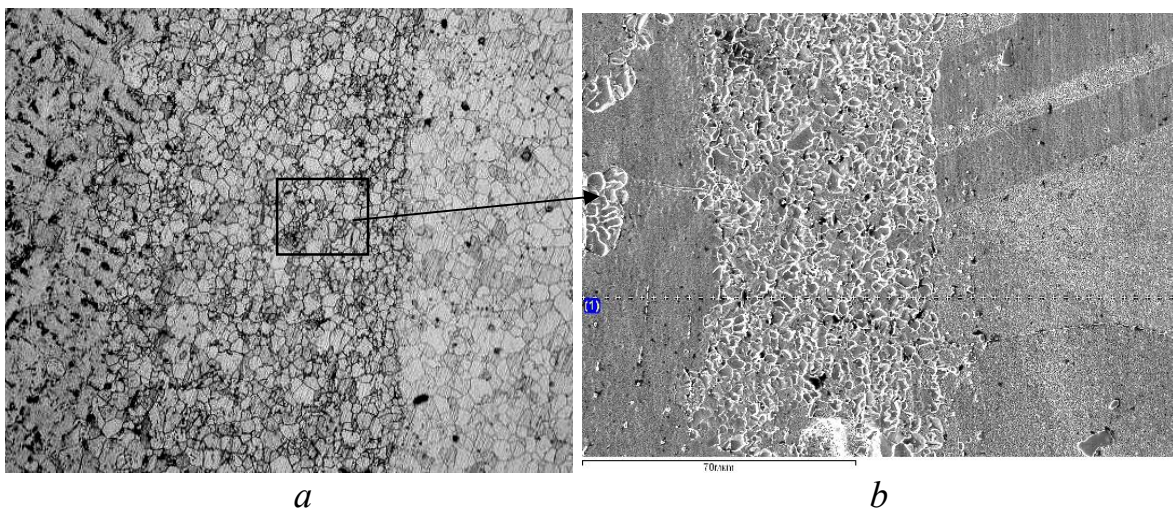
Model samples of VZhL12U and EI698 nickel superalloys, which are applied in the design of bladed discs of aviation GTE (samples were supplied by OJSC “Motor Sich”, Zaporozhje), were used to optimize FW and RBW process modes, ensuring formation of defectfree joints, which have no chemical heterogeneity, regions of cast structure or remains of NF material (fig. 2).

Presence of thermal and deformational effects of NF application in the processes of pressure welding of nickel superalloys was established. Application of NF at RBW and FW of VZhL12U and EI698 superalloys promotes highly concentrated and uniform evolution of heat and plastic deformation localization in the contact zone. Activation of the surfaces being welded over the entire section of the billets is ensured at significantly smaller values of heat input and plastic deformation.



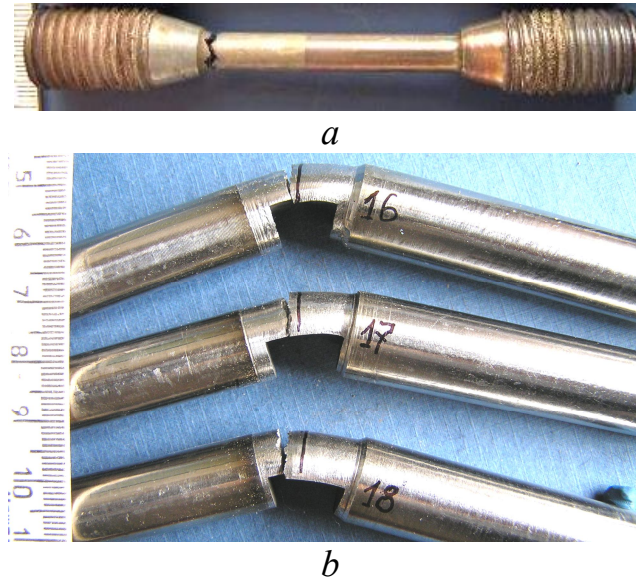
**Figure 2 – Microstructure (a) and SEM-image (JAMP9500F Field Emission Auger Microprobe) with Cr, Co, Al distribution in VZhL12U+ EI698 superalloys FW joint**

The effectiveness of NF application in pressure welding processes, which is due to localization of the processes of heat generation and deformation during welding, was demonstrated experimentally. NF application at FW allows avoiding formation of a metal interlayer of variable chemical composition and lowering of the values of the joint high-temperature strength. In RBW of VZhL12U and EI698 alloys NF application results in absence of regions of cast structure or cracks (fig. 3), formation of which is characteristic for fusion welding of these alloys.



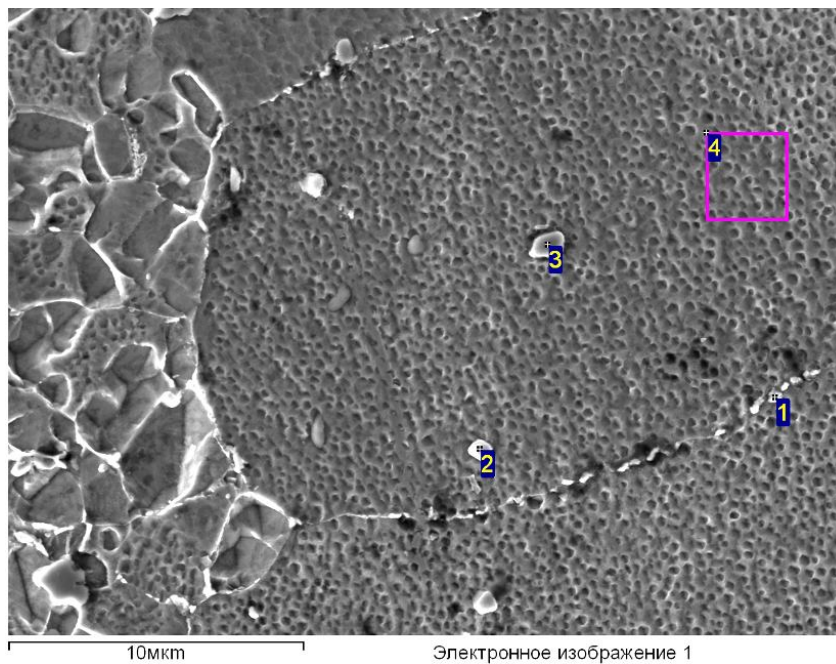
**Figure 3 – Microstructure in VZhL12U+ EI698 superalloys RBW joint,  $\times 100$  (a),  $\times 1000$  (b)**

At tensile and bend testing at 20°C temperature all the butt joints of VZhL12U and EI698 alloys made by FW and RBW with application of NF of Ti-Ni/Al-Ti system fail in the base metal of VZhL12U alloy at a distance from the joint (fig. 4).



**Figure 4 – Friction welded samples of VZhL12U and EI698 alloys after tensile (a) and bend testing (b)**

High values of strength are due to formation of fine-grained equiaxed microstructure of the RBW joints with dispersed particles of strengthening  $\gamma'$ -phase and carbides uniformly distributed in the austenitic matrix (fig. 5).



Spectrum	C	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	8.90	0.66	0.89	44.87	3.40	33.68	0.67	6.78	0.15
2	13.85	0.49	25.96	0.52	1.59	6.10	44.28	5.75	1.46
3	18.00	0.02	23.33	0.68	0.00	3.19	50.73	3.61	0.43
4	0.94	2.15	2.42	12.70	4.97	71.31	1.24	3.81	0.46

**Figure 5 – SEM-image of microstructure and the EDS results of VZhL12U+ EI698 superalloys RBW joint zone (Weight %)**

*Ищенко А.О., Рассохін Д.О., Кравченко В.М.,  
Носовська О.В.* Приазовський державний  
технічний університет, Дніпро, Україна

## **ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ ПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС І ГЗК**

Одна з наявних ремонтних проблем на гірничозбагачувальних комбінатах і в системах охолодження води на АЕС полягає в невеликому терміні служби великих насосів, зумовленому як інтенсивністю їхньої роботи, так і наявністю в перекачувальному середовищі пилоподібних абразивних частинок, що зношують робочу поверхню. Як вихід зі становища – купівля нового дорогого насоса, оскільки відновлення традиційним способом (наприклад наплавленням) не завжди дає змогу розв'язати питання відновлення, наприклад кавітаційних ушкоджень, а в разі використання чавунних деталей відновлення наплавленням потребує не лише дотримання досить складної технології, а й часто призводить до розтріскування чавуну в зоні термічного впливу. І з цього погляду стає надзвичайно актуальним питання вишукування альтернативних способів розв'язання зазначених завдань. До них насамперед слід віднести застосування двокомпонентних композитних матеріалів, що мають і міцність, і здатність чинити опір як абразивному, так і кавітаційному зносу.

**Таблиця 1 – Технічні характеристики матеріалу ДК–2**

Консистенція		Рідкий
Співвідношення компонентів суміші	вага	4:1
Смола/Затверджувач		
Питома вага (суміші)	г/см <sup>3</sup>	1,6
Час обробки	20°C/хв.	60
Час затвердіння	20°C/ч.	24
Повне затвердіння / повне хімічне навантаження	20°C/діб	7
Температурна стійкість	°C	-20/+90
Колір		зелений
Кількість для 1 м <sup>2</sup> за товщини шару в 0,35 мм	г	500
Мінімальна температура застосування	°C	+15
Мінімальна товщина шару	мм	0,35
Максимальна вологість повітря	%	75
Зберігання	місяці	36

Саме з цієї причини в Приазовському державному технічному університеті розроблено 2-компонентний матеріал на поліуретановій основі, що має і достатню твердість після полімеризації, і всі переваги поліуретанів – добре чинити опір і ударним навантаженням, і інтенсивному стиранню (табл. 1).

Попередні випробування цього матеріалу в корпусах шламових насосів під час інтенсивного впливу на нього абразивних частинок підтвердили його високу стійкість до стирання. Наступним етапом застосування цього матеріалу стало його використання для відновлення і захисту корпусу вакуумнасоса ВВН 2-300, а також коліс виправних апаратів перекачувальних насосів ОВ2-110МБК на АЕС. Результати роботи цього обладнання підтвердили стійкість цього матеріалу в умовах і кавітаційного впливу, і інтенсивного стирання. На наведених малюнках показано основні етапи виконання таких робіт (рис. 1).



*а*

*б*



*в*

**Рис. 1 – Ротор вакуум-насоса ВВН-400: *а* – зачистка лопаток; *б* – нанесення полімерного композиту; *в* – відновлений ротор**

### ***Висновки.***

1. Розроблено композитний матеріал і технології його застосування, які дають змогу не тільки відновлювати обладнання, що перекачує водні середовища, а й захищати його від впливу корозії, кавітації та абразивного зносу, збільшуючи його термін служби.

2. Матеріал був успішно використаний для відновлення корпусу вакуумнасоса ВВН 2-300 та коліс виправних апаратів перекачувальних насосів ОВ2-110МБК на АЕС, підтвердивши свою ефективність в реальних умовах.

*Клименко С.А., Клименко С.Ан., Манохін А.С.,  
Копейкіна М.Ю., Чумак А.О., Мельнійчук Ю.О.*  
Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Литовченко С.В.* Харківський національний  
університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

## **КОНТАКТНЕ РУЙНУВАННЯ ПОКРИТТІВ TiCN, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАДЖЕННЯ**

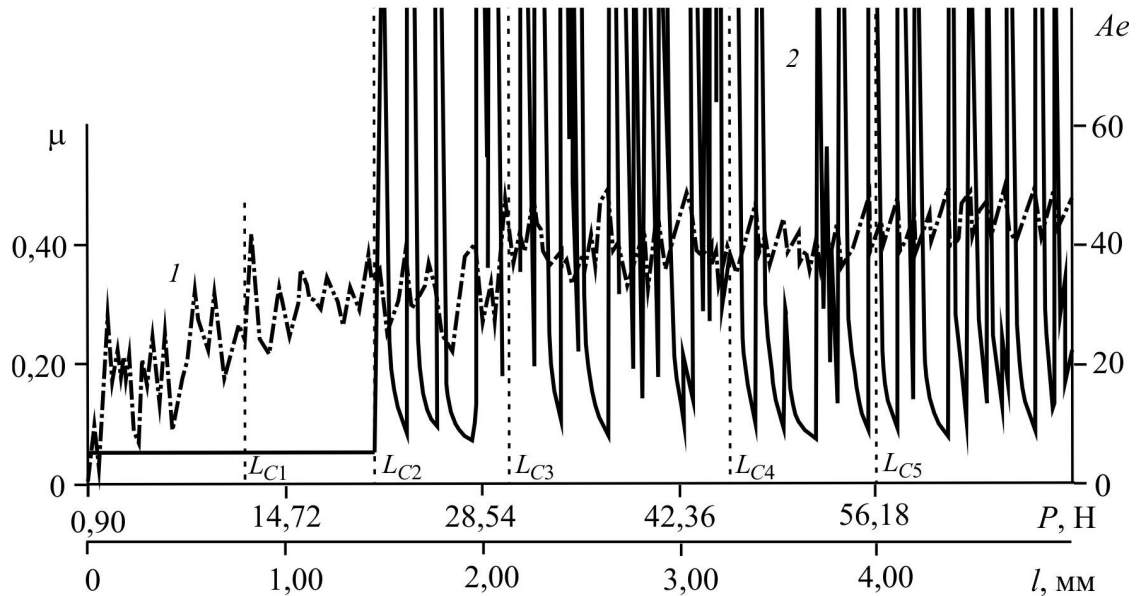
Покриття на основі TiCN можуть використовуватися в якості захисних покриттів завдяки хімічній стабільності, значної зносостійкості та високій твердості по відношенню до покриттів TiN або TiC. В останні роки при дослідженні покриттів TiCN було виявлено, що методи отримання впливають на характеристики таких покриттів.

В цієї роботі розглядалися покриттів TiCN, отримані методом вакуумно-дугового осадження. Методом скретч-тестування і визначення акустичної емісії досліджено контактне руйнування покриттів під час безперервного навантаження індентором, деформації матеріалу в пружній і пружно-пластичній областях до граничного стану.

Процес руйнування покриттів при дряпанні індентором можна розділити на декілька стадій. Приклад отриманих результатів наведений на рис. 1.

На початку процесу (область до  $L_{C1}$ ) відбувається монотонне проникнення індентора у покриття. При цьому покриття чинить істотний опір проникненню індентора, коефіцієнт тертя немонотонно збільшується, сигнал акустичної емісії (АЕ) залишається практично незмінним (область  $L_{C1}$  до  $L_{C2}$ ). Подальше збільшення навантаження від  $L_{C2}$  до  $L_{C5}$

призводить до немонотонного змінювання коефіцієнта тертя при практично незмінній глибині проникнення індентора. Це проявляється у сильних сплесках на кривій АЕ, а канавка, створена проходженням індентора, при  $L_{C4} - L_{C5}$  має однорідний характер без ламких сколів і навіть під час стирання покриття до основи, достатньо однорідна.



**Рис. 1 – Зміна середніх значень коефіцієнта тертя (1) і амплітуди акустичної емісії (2) з довжиною подряпин на поверхні покриття ( $I_a = 100$  А,  $I_\Phi = 0,5$  Ф,  $U_{zc} = -100$  В, 20%  $C_2H_2 + 80\%$  N,  $P_N = 0,53$  Па)**

Порівняльний аналіз отриманих даних свідчить, що покриття при дряпанні стираються, але не відшаровується, тобто руйнується по когезійному механізму, пов'язаному з пластичною деформацією і утворенням втомних тріщин в матеріалі покриття. У табл. 1 наведені результати випробувань зразків покриттів TiCN, отриманих за різних умов формування.

**Таблиця 1 – Результати випробувань покриттів TiCN**

Критичні навантаження, Н	Параметри осадження				
	(20% $C_2H_2 + 80\%$ N)				(40% $C_2H_2 + 60\%$ N)
	-100 В		-200 В		
	0,13 Па	0,53 Па	0,053 Па	0,53 Па	0,53 Па
$L_{C1}$	9,4	10,9	2,91	12,1	10,3
$L_{C2}$	30,1	18,6	29,40	20,4	18,5
$L_{C3}$	34,7	26,9	43,30	38,5	23,1
$L_{C4}$	44,1	39,2	56,10	46,7	42,7
$L_{C5}$	46,4	51,3	–	54,6	62,1

Отримані результати свідчать, що в залежності від елементного складу покриття адгезійна міцність змінюється: – для покриття, сформованого з використанням суміші газів 40% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+60% N, адгезійне руйнування відбувається при навантаженні  $F = 62,1$  Н, коефіцієнт тертя  $\mu = 0,45$ ; – для покриття, сформованого в використання суміші газів 20% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+80% N –  $F = 54,6$  Н,  $\mu = 0,56$ .

*Роботу виконано за фінансової підтримки НФД України в рамках виконання проєкту «Створення композитів на основі кубічного нітриду бору із захисними наноструктурними покриттями, вивчення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей в умовах формування виробів авіаційної техніки» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0046)*

*Клименко С.А., Копейкіна М.Ю. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна*

## **ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ PсVN**

Якість матеріалу різального інструменту визначається комплексом властивостей (об'ємних фізико-механічних властивостей, механічних характеристик поверхневого шару, хімічних властивостей), які залежать від температури в зоні різання.

Звичайно, неможливо забезпечити інструментальному матеріалу найбільш бажану сукупність фізико-хіміко-механічних властивостей, адже деякі показники змінюються протилежно. Тому для покращення експлуатаційних властивостей інструменту використовуються покриття, які мають відносно невелику товщину і можуть характеризуватися видатним комплексом властивостей. Відповідно до стандарту ISO 513-2014, полікристалічні композити на основі кубічного нітриду бору (PсVN) з покриттям відносяться до групи ВС. Оснащені ними інструменти є найбільш ефективними при обробці виробів з важкооброблюваних конструкційних матеріалів – матеріалів високої твердості, високоміцних сталей, нікелевих суперсплавів, абразивовміщуючих матеріалів та ін.

Наявність покриттів на контактних поверхнях інструменту призводить до зміни механіки та фізико-хімії контактної взаємодії у зоні різання, що обумовлено перерозподілом напружень у поверхневому

шарі інструменту, зміною коефіцієнта тертя  $i$ , як наслідок, сил різання і температури, а також тим, що для забезпечення найбільш оптимальних умов роботи в кожному випадку необхідно обирати таке покриття, яке б мінімізувало або усувало ефекти, що мають найбільш негативний вплив на працездатність інструменту.

Комплекс модельних експериментів показав, що покриття має суттєвий вплив на градієнт температури в різальному інструменті з  $\text{PcBN}$  у випадку, коли коефіцієнт теплопровідності покриття не перевищує  $15 \text{ Вт/мК}$ . Такі покриття спричиняють зниження температури на межі поділу системи "покриття-основа з  $\text{PcBN}$ " при різанні загартованої сталі до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Збільшення теплопровідності покриття знижує його теплозахисний ефект по відношенню до матеріалу основи різального інструменту.

Одним з основних напрямків у створенні покриттів для різального інструменту є забезпечення нанорозмірності при формуванні як структурних елементів покриття, так і окремих шарів у багатошарових композиціях. Така перевага наноструктур теоретично обґрунтована фактом суттєвої зміни фізико-механічних властивостей матеріалу при зменшенні розмірів його структурних складових. При створенні багатошарових нанотовщинних покриттів у структурі матеріалу збільшується частка міжфазних поверхонь по відношенню до загального об'єму інтерфейсів. Ці поверхні є перешкодами для поширення тріщин і дислокацій, що призводить до підвищення твердості і міцності матеріалу. Досвід показує, що наночарові покриття при нанесенні на  $\text{PcBN}$  характеризуються меншою схильністю до адгезійного відшарування в порівнянні з моноблоковими покриттями.

Враховуючи поєднання високих фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення і дисоціації хімічних сполук, що входять до покриттів, завдяки особливостям структури нанокомпозитні покриття є дуже перспективними з точки зору їх застосування на різальних інструментах з  $\text{PcBN}$ . Поряд з багатошаровими покриттями використовуються також багатокомпонентні покриття.

Жаростійкість є однієї з найважливіших вимог до покриттів для інструментів, оснащених  $\text{PcBN}$ . Найбільш жаростійкими є покриття, що містять алюміній та хром, завдяки їх здатності зберігати за високої температури хімічну стабільність, високу гарячу твердість і твердість після відпалу. Для підвищення термічної стійкості покриттів ефективним є також додавання до його матеріалу ітрію, який сприяє підвищенню стійкості до окислення, а також подрібненню зерен і втраті стовпчастої структури конденсату.

Збільшити зносостійкість інструментів можливо за рахунок створення у покритті верхнього шару, який виконує функції припрацювання. Основною вимогою до такого шару є поєднання пластичності та міцності, при цьому його твердість може бути значно нижчою за твердість основного робочого шару.

Можна припустити, що матеріал шару припрацювання повинен мати аморфно-кристалічну низькомодульну структуру. Це дозволить йому виконувати роль твердого мастила. Така архітектура покриття знижує ймовірність його крихкого сколювання в зоні, що прилягає до різальної кромки, та значно подовжує термін служби інструменту.

Зниження внутрішніх термічних напружень в покритті досягається за рахунок використання матеріалу, близького за своїм хімічним складом до основи інструменту, тобто за рахунок зменшення різниці коефіцієнтів термічного розширення покриття і основи. Відомо, що матеріали в аморфному стані мають більшу структурну однорідність в порівнянні з полікристалічними, тому для зменшення внутрішніх напружень структурного характеру ефективним є формування матеріалу покриття в аморфному стані.

Перспективним підходом для підвищення працездатності інструментів із  $\text{PcBN}$ , які використовуються у процесах високошвидкісної обробки, є застосування самоадаптивних покриттів – вони окислюються в процесі різання, утворюючи поліоксидну вторинну структуру (трибоплівку), яка відіграє роль твердого мастила.

Ідея використання покриття як проміжного середовища, що має безпосередній вплив на параметри процесу різання, реалізується за рахунок введення до покриття компонентів-інгібіторів хімічних реакцій в зоні контакту інструментального композиту з оброблюваним матеріалом. Пригнічуючи хімічно обумовлений механізм виходу зі строю інструменту із  $\text{PcBN}$ , такі покриття підвищують його стійкість при високошвидкісному різанні або обробці конструкційних сплавів, компоненти яких мають хімічну активність до  $\text{PcBN}$ .

Аналіз досвіду використання інструментів, оснащених  $\text{PcBN}$  із захисними покриттями, показує, що основні функції таких покриттів полягають у наступному: – підвищення надійності інструменту на етапі припрацювання; – збільшення періоду стійкості інструменту; – інтенсифікація режимів різання; – інформаційна функція.

На основі великої кількості досліджень механізму впливу різних покриттів на характер зношування інструментів з  $\text{PcBN}$  можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів, які є базою для створення різних перспективних систем покриттів: – підбір структурних компонентів покрит-

тя, які в процесі обробки різанням на повітрі забезпечують утворення високотемпературних поліоксидних трибоплівки на робочих поверхнях інструменту, що відіграють роль твердого мастила; – введення до складу покриття сполук, які є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії, що дозволяє змістити початок активної хімічної взаємодії в зоні обробки в діапазон більш високих швидкостей різання; – зниження коефіцієнта тертя і контактних навантажень на робочих ділянках інструменту за рахунок твердих мастил і здатності покриття до припрацювання у конкретних умовах експлуатації; – забезпечення необхідного структурного стану (аморфно-кристалічного, наноструктурного та ін.) покриття.

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

## **ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ TiNbN/CrN НАНЕСЕНИХ НА РОБОЧІ ПОВЕРХНІ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПКНБ**

Особливий інтерес для машинобудування представляють пошуки шляхів підвищення стійкості інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) при обробці важкооброблюваних жароміцних сплавів. Одним із шляхів підвищення властивостей різальних інструментів та розширення області його застосування є нанесення на робочі поверхні інструменту покриттів з підвищеними фізико-механічними та хімічними характеристиками.

На основі попередніх досліджень було встановлено, що наявність в інструментальному матеріалі NbN дозволяє підвищити стійкість інструменту за рахунок підвищення стійкості до окислення. Так нітрид ніобію є хімічно інертним до кисню та 3d-перехідних металів до температур 600–750 °С, а за температур 1000–1250 °С утворює плівку вищого оксиду ніобію Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, що попереджує подальше окиснення матеріалу.

Зразки інструментів із ПКНБ з багатошаровим покриттям TiNbN/CrN з були отримані методом PVD осадження на установці ВУ-2. Тиск азоту (N<sub>2</sub>) в робочій камері складав  $p = 8 \cdot 10^{-4}$  Торр та  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр, в процесі осадження на підкладку подавався постійний негатив-

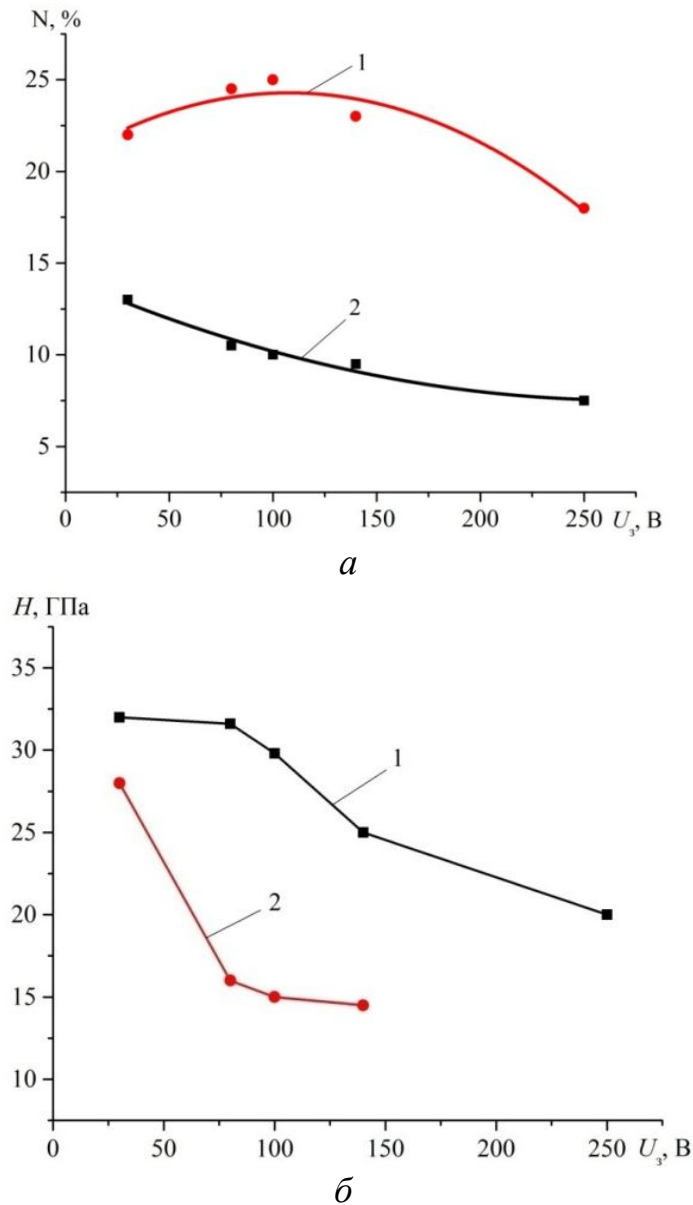
ний потенціал зміщення  $U_3 = 30, 80, 100, 140$  та  $250$  В а швидкість осадження складала приблизно  $2$  нм/с. Товщина покриття близько  $7$  мкм, загальна кількість шарів  $650$ .

Потенціал зсуву впливає на зміну вмісту азоту у PVD покриттях. Це відбувається через механізм іонно-плазмового осадження, де електричний потенціал керує енергією іонів та їх взаємодією з основою. Вищий потенціал зсуву призводить до збільшення енергії іонів азоту, що досягають підкладки. Це сприяє кращій інтеграції азоту в структуру покриття, оскільки високі енергії забезпечують глибше проникнення іонів азоту в плівку. Для нітридних покриттів на основі Ti, Nb, Cr потенціал зсуву визначає вміст азоту і, відповідно, твердості покриття. Вищий потенціал зсуву зазвичай призводить до збільшення вмісту азоту, що покращує зносостійкість покриття.

Для багат шарового покриття TiNbN/CrN при тиску азоту  $p = 8 \cdot 10^{-4}$  Торр збільшення потенціалу зсуву істотно впливає на вміст азоту в покритті рис. 1, а Зменшення вмісту азоту в покритті пов'язано із вторинним випаровуванням атомів N з поверхні покриття внаслідок відносно високої питомої ваги атомів Ti, Nb, Cr та енергії осадження.

При збільшенні тиску азоту  $p = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр відбувається монотонне збільшення вмісту азоту в покритті до значення потенціалу зсуву  $100$  В, що позитивно впливає на фізико-механічні властивості покриття, а також вказує на ефективні параметри осадження, які дозволяють протікати реакціям нітридоутворення. Подальше збільшення потенціалу зсуву до значення  $250$  В призводить до зменшення інтенсивності протікання утворення нітридних сполук в покритті за рахунок утворення більш щільної структури покриття і як наслідок вторинного випаровування атомів азоту.

Результати досліджень впливу потенціалу зсуву та тиску азоту на твердість покриття TiNbN/CrN представлені на рис. 1, б. Як і передбачалось найбільші значення твердості покриття досягаються при найнижчому значенні потенціалу зсуву і великому тиску азоту, що забезпечує найбільше насичення покриття азотом. При нанесенні багат шарових покриттів TiNbN/CrN слід уникати низьких значень тиску азоту, що може призводити до зниження азоту в покритті і утворення вакансій у підретіці азоту. У випадку TiNbN це може призвести до утворення менш твердих фаз, таких як TiNb, що знижує загальну твердість покриття. Зниження твердості при збільшенні модуля потенціалу зсуву  $U_3$  обумовлено інтенсифікацією перемішування в граничній зоні. Це призводить до збільшення частки перемішаної зони з твердорозчинним станом у відносно тонких (приблизно  $5$  нм) шарах покриття, що і знижує твердість.



**Рис. 1 – Вплив зміни потенціалу зсуву  $U_z$  на кількість азоту та твердість покриття TiNbN/CrN при тиску  $p = 8 \cdot 10^{-4}$  Торр (2) та  $p = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр (1)**

Аналіз результатів трибологічних досліджень показує, що при тиску азоту  $p = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр в покритті формуються фази TiN і NbN, які характеризуються різними типами кристалічних решіток внаслідок чого покриття більш інтенсивно зношується за рахунок збільшеної крихкості. Збільшення тиску азоту дозволяє отримати однотипну кубічну структуру решітки у шарах покриття внаслідок чого його стійкість зростає.

*Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках виконання проєкту «Створення композитів на основі кубічного нітриду бору із захисними наноструктурними покриттями, вивчення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей в умовах формування виробів авіаційної техніки» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0046) (проєкт-переможець конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди»)*

## **ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: КОНТРОЛЬ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ**

В умовах динамічного розвитку залізничної галузі та зростаючих вимог до надійності та безпеки перевезень якість використовуваних матеріалів набуває ключового значення. У сучасній залізничній галузі спостерігаються значні зміни, особливо в сфері неруйнівного контролю, де активно впроваджуються ультразвукові методи для контролю якості ключових об'єктів, таких як рейки. Системи неруйнівного контролю, включаючи мобільні засоби, такі як дефектоскопічні візки, автотриси та вагони-дефектоскопи, значно покращують точність та надійність контролю. Ці технології не тільки підвищують ефективність обслуговування, але й значно збільшують безпеку залізничного транспорту. Контроль якості матеріалів є первинною стадією перевірки їх відповідності параметрам, визначеним у нормативних документах, таких як ISO 9001, EN 50126, EN 50128 та EN 50129 [1].

Серед найбільш значних видів контролю слід виділити:

Залізнична дефектоскопія є важливою процедурою під час використання старих рейок і стрілочних переводів (рис. 1). Цей процес дозволяє виявляти та відбраковувати дефектні рейки, забезпечуючи безпеку та надійність залізничних шляхів. Завдяки дефектоскопії можна здійснювати детальний аналіз стану рейок і стрілочних переводів ще до їхнього укладання на колії, що дозволяє заощаджувати ресурси підприємства та мінімізувати витрати на ремонт і обслуговування. Виявлення дефектів у старих рейках є одним із основних завдань дефектоскопії. Тріщини, корозійні пошкодження та інші дефекти можуть бути непомітними під час візуального огляду, але вони становлять серйозну загрозу для безпеки руху [2].

Автотриси є моторними спеціалізованими транспортними засобами, що використовуються для неруйнівного контролю залізничних колій (рис. 2). Вони обладнані більш потужними та комплексними системами контролю, ніж дефектоскопічні візки, включаючи різні види датчиків (ультразвукові, магнітні, оптичні тощо).

Вагони-дефектоскопи є найбільш складними та технологічно оснащеними засобами для неруйнівного контролю [3]. Вони зазвичай

включають в себе цілий комплекс обладнання для всебічного аналізу стану залізничних колій. Крім ультразвукових методів, вони можуть використовувати радіографію, візуальну інспекцію за допомогою відеокамер, лазерні сканери та інші технології.



**Рис. 1 – Застосування системи дефектоскопії на залізничних рейках**



**Рис. 2 – Автомотриса АМВ-016**

У підсумку треба зазначити, контроль відіграє найважливішу роль у сучасній залізничній галузі, забезпечуючи високу надійність, безпеку та ефективність експлуатації інфраструктури та рухомого складу. Особливу увагу слід приділити розвитку та інтеграції автоматизованих систем неруйнівного контролю, що дозволяє значно підвищити ефективність та оперативність діагностики об'єктів залізничного транспорту.

### **Література**

1. <https://online.budstandart.com/ua/catalog/klassifikator-po-vidam-dokumentov.html?minregion=852>

2. Білокур І.П. Дефектологія і неруйнівний контроль / І.П. Білокур. – К. : Вища шк., 1990. – 207 с.

3. Патон, Б.Є. Неруйнівний контроль в Україні / Б.Є. Патон, В.О. Троїцький, Ю.М. Посипайко // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. – 2003. –№ 2(18). – С. 5–9.

4. <https://sarnynews.city/articles/161117/obijshli-planetu-dvichi-yak-pracyuyut-operatori-defektoskopii-na-zalznichnij-stancii-sarni>

*Комарова Г.Л., Кашиур А.П.* Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## **ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ: МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ**

Штучний інтелект (ШІ) стає невід'ємною частиною сучасних виробничих і бізнес-процесів. Його вплив на управління якістю є однією з найактуальніших тем у сфері технологій та менеджменту. Використання ШІ дозволяє досягти нових рівнів ефективності та точності в контролі якості продукції та послуг. Проте, з цим пов'язані й певні ризики, які необхідно враховувати для досягнення оптимальних результатів.

Можливості використання ШІ в управлінні якістю:

- Автоматизація процесів контролю якості:

ШІ може значно покращити процеси автоматизації контролю якості за допомогою машинного навчання та обробки великих обсягів даних. Наприклад, візуальний контроль продукції на виробничій лінії можна здійснювати за допомогою комп'ютерного зору, що дозволяє швидко і точно виявляти дефекти. В Україні, наприклад такі компанії як "Укрзалізниця" та "Київстар" активно впроваджують ці технології для забезпечення високої якості своєї продукції та послуг.

- Прогнозування та запобігання дефектам:

Використовуючи алгоритми машинного навчання, компанії можуть прогнозувати можливі дефекти продукції на ранніх стадіях виробництва. Це дає можливість вчасно вжити заходів для їх запобігання, зменшуючи витрати на виправлення помилок та підвищуючи рівень задоволеності клієнтів. Підприємства "Укрзалізниця" використовують такі підходи для мінімізації відходів та оптимізації виробничих процесів.

- Покращення процесу прийняття рішень:

ШІ може аналізувати великі обсяги даних і надавати рекомендації щодо оптимізації виробничих процесів. Це допомагає керівникам приймати більш обґрунтовані рішення, спрямовані на покращення якості продукції та підвищення ефективності роботи підприємства. Наприклад, українські агрохолдинги, використовують аналітику ШІ для оптимізації посівних та збиральних кампаній.

- Адаптивне навчання та розвиток персоналу:

ШІ може використовуватись для створення адаптивних навчальних програм для працівників, що дозволяє підвищувати їх компетенції в управлінні якістю. Такі програми можуть автоматично коригуватися залежно від прогресу і потреб кожного співробітника. Це важливо для таких компаній, як "Укрпошта", де постійне вдосконалення навичок працівників є ключовим для підтримання високих стандартів обслуговування.

- Розширення можливостей моніторингу та аналізу:

Застосування ШІ дозволяє підприємствам здійснювати безперервний моніторинг виробничих процесів і швидко реагувати на будь-які відхилення. Наприклад, системи ШІ можуть автоматично аналізувати дані сенсорів на виробничих лініях, визначаючи потенційні проблеми ще до їх виникнення. Це дозволяє знижувати рівень браку та підвищувати загальну ефективність виробництва. В Україні такі підходи активно впроваджуються в металургійній та хімічній промисловості.

- Покращення клієнтського досвіду:

Впровадження ШІ може також допомогти у покращенні клієнтського досвіду, зокрема через аналіз зворотного зв'язку від клієнтів та автоматизацію процесів обробки скарг. Це дозволяє компаніям швидше реагувати на проблеми клієнтів та впроваджувати необхідні зміни для підвищення якості обслуговування. "Нової Пошти", наприклад, використовує ШІ для аналізу клієнтських запитів та оптимізації логістичних процесів.

Ризики використання ШІ в управлінні якістю:

- Залежність від технологій:

Високий рівень автоматизації та використання ШІ може призвести до надмірної залежності від технологій. Це створює ризик зниження навичок працівників у сфері контролю якості та потенційні проблеми у випадку збоїв систем ШІ. В Україні, де інфраструктура не завжди стабільна, це може бути особливо критичним.

- Етичні питання та конфіденційність даних:

Використання ШІ передбачає обробку великих обсягів даних, що піднімає питання конфіденційності та етичного використання інформації. Компанії повинні забезпечити дотримання всіх нормативних вимог та стандартів щодо захисту даних. Наприклад, банки, такі як "ПриватБанк", повинні уважно стежити за тим, щоб дані клієнтів залишалися конфіденційними.

- Високі витрати на впровадження:

Впровадження систем ШІ вимагає значних фінансових вкладень, що може бути не доступним для малих і середніх підприємств. Крім того, необхідність постійного оновлення та підтримки таких систем може стати додатковим фінансовим тягарем. Це особливо актуально для регіональних підприємств в Україні, які мають обмежені фінансові ресурси.

- Невизначеність результатів:

Хоча ШІ має великий потенціал, його впровадження не завжди гарантує позитивні результати. Неправильне налаштування алгоритмів або недоліки в даних можуть призвести до помилкових прогнозів і рішень, що негативно вплине на якість продукції. Наприклад, в ІТ-компаніях, де точність алгоритмів критично важлива, будь-які помилки можуть призвести до значних фінансових втрат.

- Проблеми інтеграції з існуючими системами:

Впровадження нових технологій завжди вимагає інтеграції з вже існуючими системами управління та контролю. Це може бути складним завданням, оскільки існуючі системи можуть бути не повністю сумісними з новими рішеннями на базі ШІ. Наприклад, старі ERP-системи можуть не підтримувати інтеграцію з сучасними платформами штучного інтелекту, що створює додаткові виклики для компаній.

- Навчання та перенавчання персоналу:

Використання ШІ вимагає нових знань та навичок від персоналу. Це означає, що компанії повинні інвестувати в навчання та перенавчання своїх працівників, щоб вони могли ефективно працювати з новими системами. В Україні, де рівень технологічної грамотності може бути різним, це може стати додатковою перешкодою для впровадження ШІ.

**Висновки.** Штучний інтелект відкриває нові можливості для покращення управління якістю, підвищуючи ефективність, точність і швидкість процесів контролю. В Україні, де багато підприємств прагнуть відповідати міжнародним стандартам та покращувати свою конкурентоспроможність, впровадження ШІ стає все більш актуальним. Проте, для досягнення максимальних результатів важливо враховува-

ти і потенційні ризики, пов'язані з використанням ШІ. Це включає в себе питання етичності, захисту даних, фінансових витрат та залежності від технологій. Зважений підхід до впровадження ШІ дозволить забезпечити високий рівень якості продукції та послуг, що є ключовим фактором успіху в сучасному конкурентному середовищі.

Підсумовуючи, можна сказати, що впровадження ШІ в управління якістю має величезний потенціал для українських підприємств. Важливо, щоб компанії підходили до цього процесу з обережністю та стратегічним плануванням, враховуючи як можливості, так і ризики. Це дозволить максимально використати переваги ШІ та забезпечити сталий розвиток бізнесу.

### **Література**

1. Мельник, П.А. Інноваційні технології та управління якістю: український контекст / П.А. Мельник. – Харків : Вид. «Освіта», 2020.

2. Ткаченко, І.В. Інформаційні технології та управління якістю в Україні / І.В. Ткаченко. – Одеса : Вид. Одеського політехнічного університету, 2016..

3. Шевченко, Л.О. Штучний інтелект та управління якістю на підприємствах України / Л.О.Шевченко, Н.П. Власенко. – Полтава : Вид. Полтавського національного технічного університету, 2021.

4. Зінченко, М.В. Впровадження цифрових технологій у виробничі процеси / М.В. Зінченко та ін. – Вінниця : Вид. Вінницького національного технічного університету, 2020.

*Коротинський О.Є., Вертецька І.В. Інститут  
електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
Київ, Україна*

## **ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИВАЧІВ НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ У ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ**

У зв'язку з постійно зростаючою вартістю електроенергії, енергоефективність зварювального обладнання є досить актуальною проблемою. Тому у запропонованій доповіді основну увагу приділено обговоренню питань щодо розробки нових підходів у створенні сучасного енергоефективного зварювального обладнання, яке здатне забезпечити високий к.к.д. (до 90%), коефіцієнт потужності не менше 95%, а також

виконання вимог стандартів електромагнітної сумісності при збереженні якості реалізації технологічного процесу зварювання.

У роботі досліджено та розвинені методи підвищення енерго- та ресурсоефективності обладнання для імпульсно-дугового зварювання. Нами досліджено та запропоновано оригінальні топологічні структури перетворювачів, що використовують ємнісні накопичувачі енергії. Розглянуто теоретичні основи функціонування цього класу електронних пристроїв, а також отримано основні аналітичні співвідношення, що описують енергетичні процеси їх функціонування.

Це дозволило застосувати основні теоретичні положення щодо методу перенесення заряду для розробки нових схем зварювальних перетворювачів.

Таким чином, як предмет дослідження в даній роботі є процеси перетворення електричної енергії, що спрямовується у зварювальну дугу. Причому основна увага приділяється виключенню потужності спотворення при контролі та управлінні зварюванням.

Відмінною особливістю суперконденсаторів, які використовуються як накопичувачі, виконані на основі структур з подвійним електричним шаром, є кулонівська енергоефективність ( $K_E$ ). Саме вона визначає граничний рівень заряду, який може бути передано у навантаження, тобто у зварювальну дугу. Цей параметр досить специфічний для розрахунку енергетичних процесів, що використовують ємнісні накопичувачі в ланцюгах формування зварювального струму, тому вимагає додаткових пояснень, оскільки його необхідно враховувати при розрахунку силових схем зварювальних перетворювачів.

Пояснимо це такими простими розрахунками.

$$\text{Енергія заряду } W_3 = \frac{C_H U_3^2}{2} \quad \text{та енергія розряду } W_p = \frac{C_H U_p^2}{2},$$

де  $U_3$  – напруга заряду,  $U_p$  – напруга розряду,  $C_H$  – електрична ємність накопичувача.

Тоді енергія, передана у навантаження  $\Delta W$  визначатиметься різницею  $W_3$  і  $W_p$ :

$$\Delta W = \frac{C_H (U_3^2 - U_p^2)}{2}.$$

Якщо позначити  $U_p = \alpha \cdot U_3$ , де  $\alpha$  характеризує рівень напруги при розряді  $C_H$ , то отримаємо:

$$\Delta W = \frac{C_H U_3^2}{2} (1 - \alpha^2).$$

З урахуванням того, що заряд накопичувача дорівнює  $Q = C_H \cdot U_3$ , останній вираз можна подати в наступному вигляді:

$$\Delta W = U_3 \cdot Q \frac{(1 - \alpha^2)}{2} = U_3 \cdot Q \cdot K_E,$$

де  $K_E = (1 - \alpha^2)/2$ .

Якщо ввести параметр, який характеризує ефективність використання заряду накопичувача, позначивши його співвідношенням  $\gamma_3 = Q/\Delta Q$ , то отримаємо:

$$\gamma_3 = \frac{1}{K_E} = \frac{2}{(1 - \alpha^2)}.$$

З урахуванням цих позицій нами досліджувалися процеси тандемного дугового зварювання штучними електродами, які є досить перспективними для ремонтно-відновлювальних робіт на залізничному транспорті. У роботі наведені експериментальні результати – діаграми зварювальних струмів і напруг, а також зразки металу, що наплавляється при різних просторових положеннях електродів.

Враховуючи перспективність тандемної відновлювальної наплавки, нами запропоновано та запатентовано спеціалізовану приставку, що реалізує цей метод з будь-яким зварювальним апаратом.

У роботі показано, що комбіноване використання штучної довгої лінії спільно з ємнісними накопичувачами енергії дозволяє реалізувати режим динамічного горіння дуги, які забезпечують високу стійкість дугового процесу, а також покращення формування зварних з'єднань.

*Коротинський О.Є., Жерносков А.М., Вертецька І.В.*

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, Київ, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ**

Визначення енергетичної ефективності зварювального обладнання потребує точного знаходження його параметрів потужності. Відомо [1], що найточнішою оцінкою активної потужності зварювальної дуги

є взаємна кореляційна функція (ВКФ) струму зварювання та напруги на дузі. ВКФ можна знайти у вигляді (1):

$$P_D(\tau) = 1/T_C \int_0^{T_C} i(t)U_D(t+\tau)dt \quad (1)$$

де  $T_C$  – інтервал спостереження процесу,  $\tau$  – інтервал кореляції,  $i(t)$ ,  $U_D(t)$  – відповідно струм та напруга.

Цифровий вираз  $P_D(t)$  видається досить громіздким та вимагає більше часу процедурно. Для її визначення в реальному режимі часу на основі швидкодіючих сигнальних процесів потрібен вибір алгоритмів, які здатні забезпечити високу швидкість обробки сигналів струму та напруги. Як відомо [2], одним із таких підходів є застосування інтегралу Стілтєса. Якщо ввести в (1) позначення:

$$I(t) = \int_0^{T_C} i(t)dt \quad (2)$$

то з урахуванням (2) формула (1) може бути подана у вигляді:

$$P_D(\tau) = 1/T_C \int_0^{T_C} U_D(t_j)dI(t) \quad (3)$$

де  $U_D(t_j)$  – сигнал, що пройшов через амплітудний квантувач.

При обчисленні інтеграла Стілтєса припускаємо, що інтервал  $T_C$  спостереження поділяється на підінтервали  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  та сигнал  $U(t+\tau)$  множиться на  $I(t)$  на даному інтервалі:

$$\Delta I_i = \int_{t_i}^{t_i+\Delta t_j} i(t)dt \quad (4)$$

Потім усі отримані добудки підсумовуються. При використанні цього алгоритму  $U(t+\tau)$  приймає невелику кількість значень, що прискорює алгоритм визначення ВКФ.

Подальші процедури визначення ВКФ виконуються відповідно до віртуальної схеми реалізації алгоритму кореляції за Стілтєсом.

До складу схеми входять такі вузли: амплітудний квантувач, блок затримки, набір ключових елементів ( $K1-Kn$ ) та інтегратор. Робота та синхронізація всіх вузлів пристрою задається блоком керування. Ключі  $K1-Kn$ , що відкриваються через інтервал  $\Delta t$ , визначає дискретний режим роботи корелятора. У цьому випадку вираз (3) зводиться до вигляду:

$$P_D(k\Delta t) = 1/(N-k) \sum_{j=k}^{N-1} I_j \cdot U_{\Delta(j-k)} \quad (5)$$

$$\text{де } \left. \begin{array}{l} I_j = i(j\Delta t) \\ U_{\Delta j} = u(j\Delta t) \end{array} \right\} j = 0, 1, \dots, N-1$$

Після квантування за часом сигнал напруги квантується з низькою розрядністю по амплітуді з кроком  $\Delta U$ . Позначимо укрупнений інтервал  $-(K_{i+1} - K_i)\Delta t$ , всередині якого  $U_{\Delta}(t)$  збереже постійні значення. Але поза ним змінюється за законом:

$$U_{\Delta}(j\Delta t) = m_i \Delta U, \quad (6)$$

де  $K_i < j < K_{i+1}$ . Тут  $i$  – порядковий номер інтервалу  $\Delta K_i = K_{i+1} - K_i$ .

З урахуванням цих позначень (5) може бути виражена наступною формулою:

$$P_{\Delta}(k\Delta t) = \Delta U / (N - k) (m_0 \sum_{j=k}^{K_1+k-1} I_j + m_1 \sum_{K_1+k}^{K_2+k-1} I_j + \dots + m_M \sum_{K_M+k}^{N-1} I_j) \quad (7)$$

Співвідношення (7) є алгоритмом визначення ВКФ, що найбільш швидко сходиться. Його апаратна реалізація може бути виконана на базі сигнальних процесорів Piccolo [3]. За попередніми оцінками час знаходження ВКФ з точністю 0,5% може становити 40–60 мс. Також швидкодія дозволяє рекомендувати цей пристрій для управління процесами в реальному масштабі часу.

У доповіді буде представлено блок-схему реалізації алгоритму ВКФ, а також графічне пояснення процедури її обчислення за інтегралом Стілтєса, викладено результати експериментального дослідження описаного вимірювача параметрів зварювальної дуги.

## Література

1. Korotynskii, A.E. Functional reliability of welding equipment / A.E. Korotynskii, N.M. Makhlin, S.I. Poloskov // *Welding International*. – 2005. – Vol. 19, Is. 2. – P. 145–147.
2. Мокін, Б.І. Про один із підходів наближеного обчислення інтегралів Стілтєса і Лебега на мові Python в задачах системного аналізу з дискретними моделями / Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, Д.О. Шалагай // *Вісник ВПІ*. 2021. – Вип. 3. – С. 61–68.
3. Дмитриев, М. Piccolo – новое семейство микроконтроллеров от Texas Instruments / М. Дмитриев // *Chip News Украина*. – 2009. – № 3. – С. 44–47.

*Кузін О.А., Копилов В.І.* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ,  
*Кузін М.О.* Національний університет «Львівська політехніка», Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, Львів, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ СТРУКТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КОЛІСНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ ЗМІЦНЕННІ**

На основі розроблених підходів ієрархічного моделювання проведена оцінка параметрів зміни локальних властивостей зернограничних областей шару плазмового зміцнення колісних сталей. Зони, що мають поверхні поділу з близькими значеннями зернограничної енергії, характеризуються більш високим опором до утворення розсіяних пошкоджень, мікроскопічних тріщин і зношування при контактній взаємодії.

В даний час накопичена значна кількість експериментальних даних про вплив поверхонь поділу структурних складових з різною енергією на поведінку полікристалічних сплавів в процесі пластичної деформації і руйнування. Для встановлення зв'язку між структурою, властивостями, енергетичними параметрами поверхонь поділу конструкційних сплавів та опором утворенню міжзеренних пошкоджень важливе значення має розробка підходів до моделювання і аналізу механічної поведінки граничних зон поділу виробів з врахуванням їх енергії.

При експлуатації залізничних коліс під дією знакозмінних навантажень в їх поверхневому шарі відбувається утворення розсіяних пошкоджень, розміри яких одного порядку із елементами структури, що сприяють розвитку магістральних тріщин [1]. Утворення розсіяних пошкоджень відбувається в місцях локальної зміни механічних властивостей сплавів – границь і стиків зерен. В залежності від кутів між границями у стиках зерен змінюється структурно-енергетичний стан даної області та його здатність до утворення мікрodefектів.

Дослідити параметри стану поверхонь поділу структурних складових і їх роль у формуванні властивостей колісних сталей після плазмового зміцнення.

Для підвищення ресурсу колісних пар проводять плазмове зміцнення гребенів бандажів локомотивів. В результаті формується шар термічного зміцнення товщиною 2,6–2,7 мм, який поділяється на три

зони: різнозернистості (розмір зерен від 6 до 20 мкм), однорідних зерен (15–18 мкм) і дрібних зерен (до 7 мкм).

В якості цифрового двійника структури шару зміцнення, який описує поведінку сплаву в умовах контактних навантажень, використали матричне представлення системної моделі з її наповненням кількісними характеристиками структури [2].

Результати визначення кутів в потрійних стиках границь поділу різних зон шару плазмового зміцнення показані у табл. 1.

**Таблиця 1 – Частка кутів між границями в потрійних стиках зерен градієнтного шару бандажа залізничного колеса після плазмового зміцнення**

Відстань від поверхні, $10^{-3}$ м	Діапазони кутів між границями в потрійних стиках зерен, градуси						
	40–60°	61–80°	81–100°	101–120°	121–140°	141–160°	161–180°
	Частка в загальній кількості замірених кутів, %						
0,45	0	6,67	16,67	23,33	23,33	26,67	3,33
1,40		0,0	3,33	56,67	33,33	6,67	0
2,60		0,0	14,33	26,67	46,67	12,33	

На глибині 0,45 мм шару плазмового зміцнення присутні поверхні поділу, кути між якими в потрійних стиках знаходяться в діапазоні від 61–180°, які мають значну різницю за енергіями. На віддалі 1.4 мм кути між поверхнями поділу в потрійних стиках зерен знаходяться в діапазоні 81–160°, що вказує на підвищення їх однорідності розподілу за енергіями. За глибиною твердість шару зменшується від HRC 31 до твердості незміцненого металу 26 HRC, а мікротвердість від  $H_{\mu} = 3700$  МПа до  $H_{\mu} = 3600$  МПа.

З використанням підходів локально-градієнтної механіки пошкоджених середовищ виявлено, що присутність поверхонь поділу зерен з високим градієнтом енергії збільшує питому величину знеміцненої зони поверхневого шару після плазмової обробки.

**Висновки.** Зростання частки поверхонь поділу зі значною різницею в рівні зернограничної енергії зменшує зносотривкість локальних об'ємів зміцненого шару. При підвищенні однорідності розподілу поверхонь поділу зерен за енергіями ефективно зростає опір утворенню міжзеренних пошкоджень, стійкість до руйнування при контактній взаємодії колісних сталей.

## Література

1. Трощенко, В.Т. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия / В.Т. Трощенко, Г.В. Цыбанев, Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов. – К. : ИПП НАН Украины, 2009. – 661 с.
2. Kopylov V. Improving contact durability of polycrystalline systems by controlling the parameters of large-angle grain boundaries/ V. Kopylov, O. Kuzin, N. Kuzin // Eastern-European J. of Enterprise Technol. – 2019. – №5/12 (101). – P. 14–22.

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

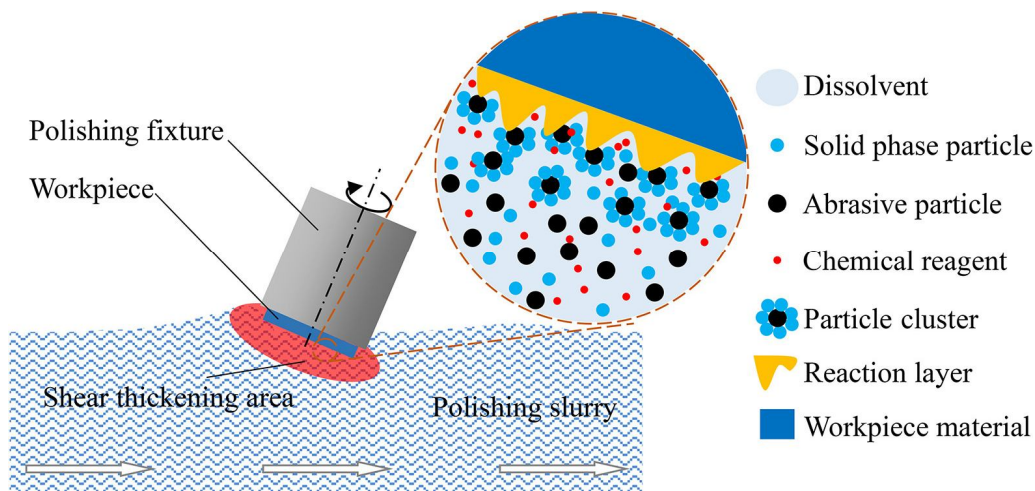
## **СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ПОЛІРУВАННЯ, ЯК ПРИКЛАД СПРЯМОВАНОГО ДОСЯГНЕННЯ ВИСОКОЯКІСНОЇ РІЗАЛЬНОЇ КРОМКИ ІНСТРУМЕНТУ**

Усією попередньою практикою інструментального виробництва та застосування різального інструменту у промисловості доведено, що для досягнення ефективного та економного використання цього сучасного високовартісного інструменту треба не тільки забезпечити високоякісну шліфовану їх поверхню, але і мати доведену різальну кромку. Це є однаковим як для інструменту з швидкорізальних сталей, коли необхідно уникнути небажаних задирок на різальному лезі, так і для твердих сплавів, керамік та надтвердих керамік, коли необхідно уникати викришування на кромці. Досягнути цього можливо лише доведенням після шліфування різальної кромки, а і навіть її поліруванням, коли шорсткість передньої та задньої поверхонь інструменту доводиться до  $Ra\ 0,05$  мкм, а і навіть менше, що значно підвищує зносостійкість різального інструменту та якість обробленої ним поверхні.

Між тим, нині спостерігаються дослідження спрямовані немов би на підвищення зносостійкості зміною поверхонь різального інструменту, але на шорсткість цих поверхонь взагалі не звертається увага. Яскравим прикладом такого нехтування є стаття [1], де розглядається підвищення зносостійкості шліфованих пластин з твердих сплавів шляхом хімічної обробки (пасивації). При цьому шорсткість поверхні вихідної пластини складала за параметром  $Ra\ 1,3\pm 0,2$ , а шорсткість травленої поверхні  $Ra\ 0,6\text{--}0,7$  [1]. На цьому робиться висновок, що зносостійкість травленої пластини підвищується у 2 рази. Здавалося б нове

слово у обробці твердих сплавів. Але насправді таке дослідження викликає тільки подив. Якщо у нас така шорсткість різниться у 2 рази, то зазвичай і знос буде різнитися саме у 2 рази. Але не це головне. Головне, яка це шорсткість. Насправді різальні пластини RNMN 120400T (так в статті [1]) з вказаною вище шорсткістю є бракованими, бо такі пластини повинні мати шорсткість поверхонь за параметром  $Ra$  ніяк не більше 0,20 мкм і бути доведеними. Тобто оті вище вказані пластини автора [1] є бракованими як у вихідному стані, так і у пасивованому, і проводити оті дослідження і робити на їх основі висновки [1] є не тільки некоректним, а і є невіглаством. На важливість мати доведені поверхні пластин, а відтак і різальні кромки вказували ще 50 років тому вітчизняні дослідники: Бакуль В.М., Захаренко І.П., Шепелєв А.О., Грабченко А.І., Матюха П.Г. та інші, а власне долучався і автор цих тез. Але хто своїх читає. Тому, ми в даних тезах і звернемо увагу на сучасні дослідження закордонних дослідників, може це якось вплине на сучасних невігласів. Спеціально для них.

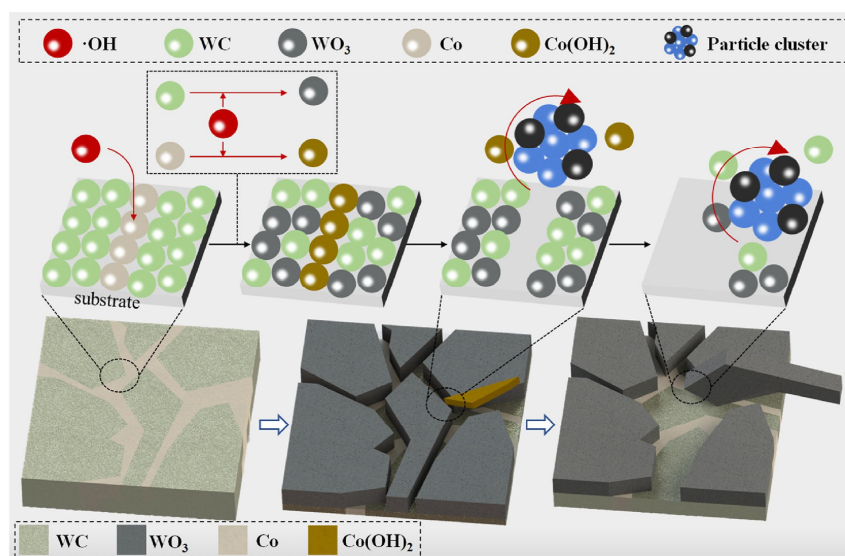
Обробка поверхні твердого сплаву до атомарного рівня є давньою задачею в сфері виробництва і обробки матеріалів [2]. Для отримання якісних виробів з цементованого карбїду складної форми в даній статті пропонується новий процес «хімічної поліровки з потовщеним зрушенням» (chemistry enhanced shear thickening polishing – C-STP) із застосуванням реагенту Фентона для отримання кінцевої поліровки розміром меншим 10 нм зі швидкістю, що вдвічі перевищує швидкість звичайного STP. На рис. 1 показано схематичне зображення процесу C-STP, де хімічний реагент у полірувальній суспензії завдяки своїй високій хімічній спорідненості дифундує на поверхню заготовки та реагує з заготовкою (сплав карбїду вольфраму та кобальту).



**Рис. 1 – Схематичне зображення процесу C-STP [2]**

Поверхневий матеріал заготовки окислюється до реакційного шару, який легко видаляється завдяки одночасному механічному впливу зерен.

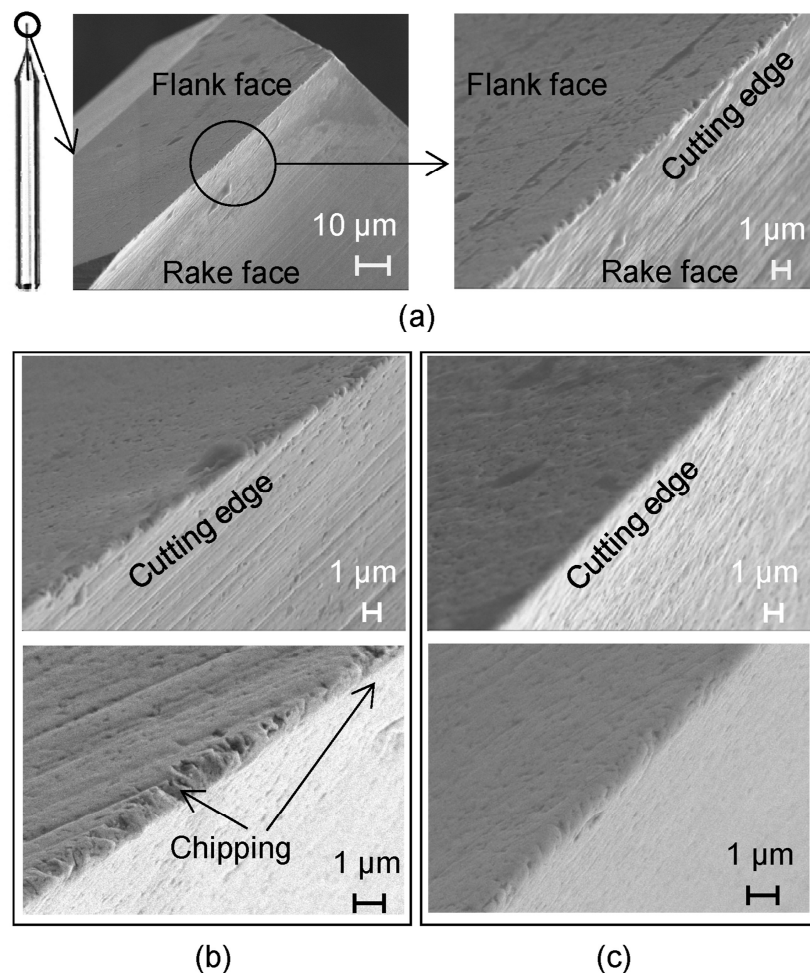
Виходячи з результатів EDS та XPS аналізу, на рис. 2 наведений механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму–кобальт з суспензією Fenton в процесі C-STP. На першому етапі елемент Co на поверхні сплаву карбід вольфраму з кобальтом спочатку окислюється до  $\text{Co}(\text{OH})_2$  за рахунок сильного окислювача  $\cdot\text{OH}$ , оскільки він має більш низький реакційний потенціал, ніж WC. В подальшому деяка частина WC окислюється до  $\text{WO}_3$ . Крім того, реакційний шар, що утворюється на верхній поверхні, є рихлим, що означає, що його легше видалити, аніж сплав карбіду вольфраму і кобальту.



**Рис. 2 – Механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму з кобальтом методом C-STP з реагентом Фентона [2]**

На другому етапі завдяки абразивним частинкам  $\text{Co}(\text{OH})_2$  на поверхневому шарі твердого сплаву швидко видаляється. На третьому етапі видаляється елемент Co, який є зв'язуючою фазою в твердому сплаві. Між твердою фазою WC зникають зв'язки, тому зерна WC і його рихлі оксиди відносно легко видаляються абразивними частинками. Як наслідок, свіжа поверхня знову оголюється, що може прискорити реакцію окислення, а синергія як хімічної, так і механічної дії підвищує ефективність поліровки твердого сплаву.

Мікросвердла (Shenzhen Jinzhou Precision Technology Co., Китай) з твердого сплаву YG-6 були вибрані для перевірки застосування C-STP з реагентом Фентона. На рис. 3 (а) представлена структура форми кромки мікросверла після шліфування діаметром 0,4 мм, на ріжучій кромці якого чітко спостерігаються численні дефекти.

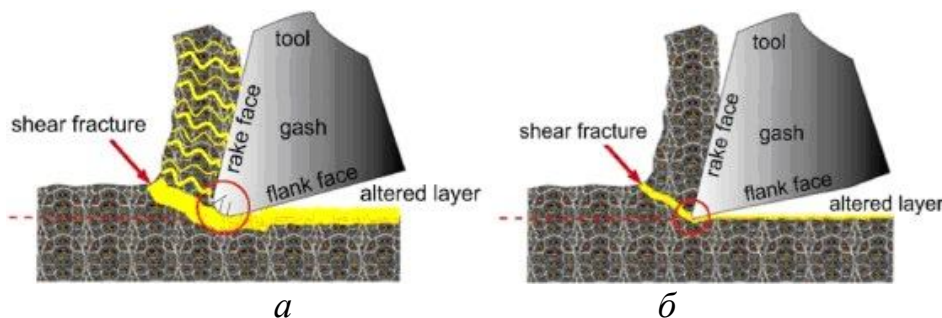


**Рис. 3 – Порівняння різальної кромки мікросвердла: (а) ріжуча кромка без поліровки, (б) поліровка суспензією STP, (с) поліровка суспензією C-STP [2]**

Для вирішення цієї проблеми були використані методи STP та C-STP для поліровки мікросвердла протягом 3 хв. Як показано на рис. 3 (b) після 3 хв. STP на ріжучій кромці все ще залишається деяка стружка і сліди шліфовки на передній поверхні. Мікросвердло після 3 хв. C-STP (із застосуванням реагенту Фентона, в % за масою: 0,1  $H_2O_2$  та 0,6  $FeSO_4$ ) показане на рис. 3 (c), де видно, що різальна кромка повністю згладжена, а сліди шліфовки на передній поверхні усунені. Запропонований процес C-STP допоміг знизити шорсткість поверхні твердого сплаву з вихідного значення  $Sa$  від  $120 \pm 10$  нм до  $8,4 \pm 0,5$  нм менш ніж за 9 хв. Усунення мікродофектів на різальній кромці дозволяє, знизити інтенсивність її зношування і підвищити надійність та продуктивність процесу різання [2].

В статті [3] розроблений абразивний круг для твердофазного хіміко-механічного полірування (SPCMP) і ефективного заточування різальної кромки твердосплавного інструменту (WC-Co). Вимірювання методом дифракції рентгенівських променів і дифракції зворотного розсіяння електронів показали, що метод SPCMP видаляє приховані

подряпини з поверхні матеріалів WC–Co, нанесені алмазним кругом. На рис. 4 показана взаємодія між різальним інструментом і заготовкою під час процесу різання.



**Рис. 4 – Різання комерційним інструментом (а) і інструментом з кромкою, заточеною по запропонованій у дослідженні [3] технології (б): (а) заготовка суттєво змінюється інструментом в процесі різання, (б) заготовка демонструє незначні зміни під час різання.**

При спостереженні у електронному мікроскопі різальні кромки комерційних інструментів мають істотні нерівності, а це збільшує площу контакту з заготовкою і опір різанню. Нерівність різальної кромки також впливає на підвищення температури під час різання, а поверхня заготовки піддається підвищеній деформації обробки за рахунок незадовільної форми різальної кромки, що ще більше збільшує нерівність обробленої поверхні. Запропонований в даній роботі спосіб заточки різальної кромки призначений зменшити площу контакту з заготовкою і опір різанню, а відтак зменшує механічну деформацію обробленої поверхні. Розроблений шліфувальний круг SPCMP [3] діаметром 100 мм був виготовлений на фенольному зв'язуючому із застосуванням зеленого карбиду кремнію (GC) у якості абразивної складової. В цьому дослідженні шліфувальний круг SPCMP був виготовлений таким чином, щоби уникнути при обробці твердого сплаву переходу з фази WC в фазу  $W_2C$ , а спровокувати окислення фази WC і її видалення за допомогою GC. Основною функцією круга SPCMP було отримання гострих різальних кромок твердосплавних інструментів (WC–Co). При різанні інструментами WC–Co з різальними кромками, заточеними обробкою SPCMP, опір різанню був низьким, а степінь зносу зменшилася. Крім того, швидкість різання інструментів WC–Co при різанні Ti–6Al–4V і Inconel 718 після заточки різальної кромки кругом SPCMP була приблизно в два рази вищою, аніж до SPCMP. Встановлено, що різання жароміцних сплавів інструментом WC–Co з гострою різальною кромкою приводить до структурних дефектів тіль-

ки поблизу поверхні, а кристалічна структура зберігається на певній глибині від поверхні [3].

Карбід вольфраму без зв'язуючого (В-WC) – твердий і крихкий керамічний матеріал, який в основному використовується для виготовлення точних прес-форм у галузі оптики, але він незадовільно піддається точній та високоефективній поліровці. В статті [4] для вирішення цього застосований інструмент з напівжорсткою кришкою (SRB) радіусом 40 мм. Він складається з трьох шарів. Зовнішній і внутрішній шари є резиновими мембранами з твердістю за Шором 75 HA. Середній шар виконаний з листа нержавіючої сталі товщиною 0,3 мм, що дозволяє підвищити жорсткість інструмента і зберегти певну гнучкість. Зовнішня резинова плівка вкрита полірувальною подушечкою. В роботі [4] були проведені експерименти, щоби продемонструвати характеристики поліровки і видалення матеріалу, характерні для SRB на підкладках В-WC. Відзначається, що шорстка поверхня перетворилася на дзеркальну вже після 2,5 хв полірування. А шорсткість поверхні в *Sa* була зменшена з 104 нм в середньому до 3,7 нм. Крім того, глибокі сліди від шліфувального інструменту були ефективно видалені, залишивши лише нанометричні подряпини від полірувального абразиву. Результати свідчать, що SRB є ефективним для швидкої поліровки В-WC з гарною якістю поверхні і підповерхневого шару.

Наведене вище свідчить про те, що сучасні закордонні дослідники приділяють належну увагу поліруванню твердих сплавів і якісній різальній кромці.

## Література

1. Ботвінко, В.П. Підвищення зносостійкості шліфованих ріжучих пластин з твердих сплавів шляхом хімічної обробки / В.П. Ботвінко // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2022. – Вип. 25. – С. 271–285.

2. Wang, Jiahuan. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, Yu Zhou, Yanfei Dai, Jinhu Wang, Qiankun He, Julong Yuan, Binghai Lyu // J. of Mat. Res. and Technol. – 2023. – Vol. 25. – P. 6865–6879.

3. Tanaka, Yayoi. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing / Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu // J. of Mat. Res. and Technol. – 2022. – Vol. 20. – P. 606–615.

4. Ke, Xiaolong. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, Yongheng Yu, Tianyi Wang, Bo Zhong, Zhenzhong Wang, Jiang Guo, Chi Fai Cheung, Chunjin Wang // J. of Mat. Res. and Technol. – 2023. – Vol. 24. – P. 1597–1611.

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

## **ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІНТЕТИЧНИХ АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ З РІЗНИМ ВМІСТОМ ВНУТРІКРИСТАЛІЧНИХ МЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ**

Для розвитку машинобудівної галузі важливим напрямком є застосування ефективних абразивних інструментів на основі порошків синтетичного алмазу. При алмазно-абразивній обробці поверхні деталей на зносостійкість та ефективність роботи шліфувального інструменту впливають характеристики алмазних порошків, які формуються в процесі синтезу алмазу, сортування та класифікації. В інструментальному виробництві широко застосовуються порошки синтетичного алмазу марок АС6-АС20 при обробці твердого сплаву, кераміки, скла та інших крихких матеріалів. Працездатність будь-якого алмазомісткого інструменту значною мірою визначається властивостями алмазів.

Властивості алмазних порошків, в свою чергу, обумовлюються технологіями синтезу, вилучення, обробки, класифікації за розмірами і формою, сортування за фізико-хімічними властивостями, модифікування поверхні, що забезпечує отримання порошків із заданими властивостями.

Розвиток існуючих конструкцій алмазного інструменту обумовлений рядом чинників: вимогами підвищення експлуатаційної надійності деталей машин, появою нових матеріалів для зв'язуючих, покращенням якості алмазних шліфпорошків, а саме їх фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей.

Кристали алмазу мають високу поверхневу енергію і певну адсорбційну активність по відношенню до окиснювачів. Дії окиснювачів

(кислот, лугів) сприяють адсорбції кисню на поверхні кристалів алмазу. При цьому на поверхні граней алмазу з більш дефектною поверхнею буде більше адсорбційних центрів. Такі кристали алмазу, насичені киснем, виявляють гідрофільні властивості, тому оцінка гідрофільності кристалів алмазу дозволить оцінити стан поверхні цих кристалів.

Дослідження проводили на алмазних шліфпорошках марки АС20 зернистості 200/160, отриманих в системі Ni-Mn-C, які попередньо розділяли у магнітному полі з виділенням шліфпорошків алмазів магнітної та немагнітної фракції. В одержаних порошках визначали фізико-механічні характеристики: міцність, як показник міцності при статичному стисненні при кімнатній температурі ( $P$ , Н) і після термічної обробки при 1100 °С, розраховували термостійкість у вигляді коефіцієнта термостабільності ( $K_{ТС}$ ). Методом Фарадея оцінювали питому магнітну сприйнятливості  $\chi$  (м<sup>3</sup>/кг); загальний вміст включень та домішок  $\beta$  (% за масою) визначали у вигляді неспаленого залишку (н/з), отриманого після тривалої високотемпературної обробки до сталої маси. Фізико-хімічні властивості порошків їх гідрофільність оцінювали по величині вільної енергії насичення водою 1 г досліджуваного порошку НТМ ( $\Delta C_S$ ) в Дж/моль·г. Всі дослідження виконували за методиками розробленими в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля.

Результати досліджень фізико-механічних та фізико-хімічних досліджень алмазних шліфпорошків марки АС20 зернистості 200/160 вихідних, магнітних та немагнітних фракцій приведено у табл. 1.

**Таблиця 1 – Результати досліджень фізико-механічних та фізико-хімічних досліджень алмазних шліфпорошків марки АС20 зернистості 200/160 вихідних, магнітних та немагнітних фракцій**

Найменування фракції	$\chi \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /кг	н/з, $\beta$ , % (за масою)	$P$ , Н	$K_{ТС}$ , %	$\Delta C_S$ , Дж/моль·г
Магнітна	31,4	4,25	33,5	31	2,1419
Немагнітна	5,9	1,57	30,7	38	1,4351
Вихідна	19,5	3,35	25,7	36	2,0508

Як впливає з таблиці, після поділу в магнітному полі алмазні шліфпорошки магнітної та немагнітної фракції розрізняються між собою за величиною питомої магнітної сприйнятливості у 5,3 рази, за вмістом у них включень та домішок у 2,7 рази. Зміна міцності при кімнатній температурі незначна для алмазів обох фракцій, але зниження міцності після термічної обробки при 1100 °С призводить до зниження

міцності алмазів магнітної фракції через великий вміст у них включень та домішок, що призводить до зменшення їх термостійкості у вигляді коефіцієнта термостабільності у 1,7 рази.

Ступінь гідрофільності алмазних шліфпорошків магнітної та немагнітної фракцій, яку оцінювали за зміною величини вільної енергії насичення поверхні порошоків парами води у 1,5 разів вищі, ніж гідрофільність алмазів немагнітної фракції.

Таким чином, проведені дослідження показали, що алмазні шліфпорошки з більш високим вмістом домішок і включень і з високою термостійкістю є і більш гідрофільними, тобто їх поверхня має більшу кількість адсорбційних центрів і більш насичена киснем і має більш високу поверхневу енергію. Тому гідрофільність поверхні алмазів є одним із показників оцінки дефектності їх поверхні і може бути критерієм якості алмазів.

*Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д., Смоквина В.В.*  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, Київ,  
*Солод В.Ю., Музичка Д.Г.* Дніпровський  
державний технічний університет МОН України,  
Кам'янське, Україна

## **СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАЯВНОСТІ АДСОРБОВАНОЇ ВОДИ ТА ГІДРОКСИЛЬНИХ ГРУП НА ПОВЕРХНЯХ АЛМАЗІВ ТА СУПУТНІХ МАТЕРІАЛАХ**

Відомо, що за умов шліфування без охолодження, важливим є забезпечити наявність води у зоні контакту. Одним з варіантів може бути рішення – доставити воду в зону контакту саме на поверхні алмазу. Але що ми можемо взнати про адсорбовану воду на поверхнях, розберемося із відомостей за сучасними дослідженнями, що нами і викладено далі.

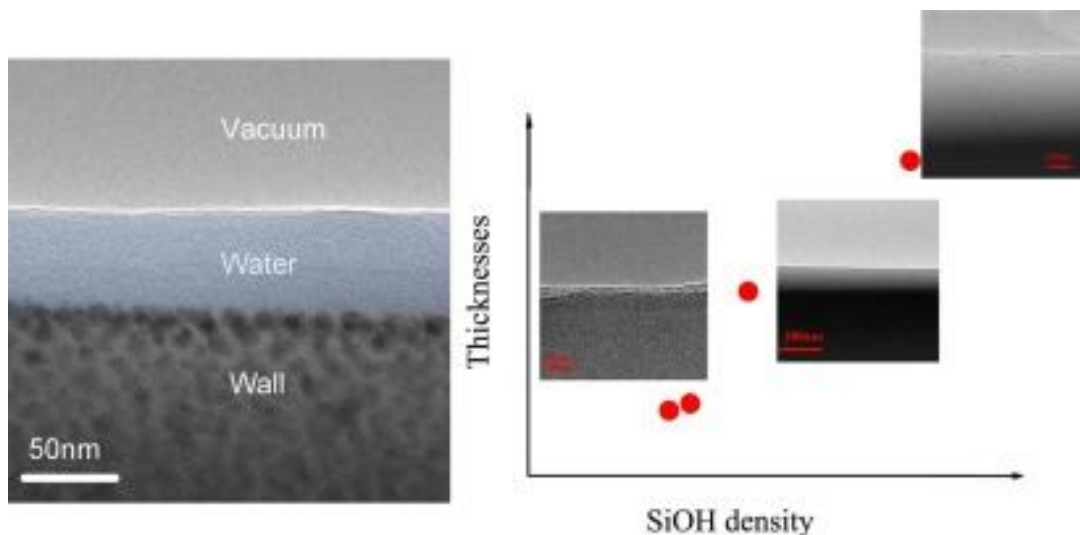
Поведінка при терті необроблених поверхонь полікристалічного алмазу (PCD) є важливою для його застосування. Однак взаємодія між електрохімічною корозією, капілярною адгезією та фрикційною поведінкою PCD у контактах із кількома нерівностями ще недостатньо вивчена. Тому в статті [1] показаний вплив на це водяного середовища. У цій роботі кількісно оцінена міжфазна капілярна адгезія на контакт-

них поверхнях та її вплив на реакцію тертя між колоїдною мікросферою та шорсткими плівками PCD до та після електрохімічної корозії в умовах занурення у воду, низької відносної вологості та вологого повітря. Для цих контактів з кількома нерівностями продемонстровано, як електрохімічна корозія впливає на гідрофільність поверхонь PCD і як капілярна адгезія внаслідок конденсації води сприяє силі тертя. Сукупні результати переконливо вказують на те, що спостережуване збільшення сили тертя на електрохімічно корозійних поверхнях PCD (для мікрористалічного MCD та нанористалічного NCD) регулюється посиленням капілярної адгезії на контактній поверхні, що саме і залежить від гідрофільності поверхні та вологості навколишнього середовища. Тобто наявність води за умов підвищеної вологості змінює умови контактування.

В статті [2] досліджені властивості та поведінка міжфазної води на поверхнях твердого кремнезему та її наслідки для різних застосувань. Використані трансмісійна електронна мікроскопія, ядерний магнітний резонанс, мас-спектрометрія, інфрачервона та комбінаційна спектроскопія, щоб дослідити наявність і характеристики аномальної води на поверхнях кремнезему. Виявлено стабільний нанорозмірний шар води, пов'язаної зі стінками, на внутрішній поверхні силікатних трубок, який зберігається як за умов високого вакууму так і кімнатної температури. Цей шар багатий гідратованими іонами водню та має товщину, яка корелює з щільністю гідроксильних груп у кремнеземі. За допомогою додаткових експериментів продемонстровано, що зменшення щільності гідроксильних груп кремнезему змушує воду, пов'язану зі стінкою, повертатися до рідкого стану, що підкреслює ключову роль гідроксильних груп у формуванні цього унікального шару води (рис. 1). Це дослідження надає цінну інформацію про властивості та поведінку міжфазної води на твердих поверхнях.

На значення гідроксильних груп звернена увага і в роботі [3] для нового графіт/алмазного композиту (Gradia). Довершена поверхня відіграє вирішальну роль у використанні Gradia. Однак контрольоване видалення поверхневого шару Gradia є складним, оскільки фізичні та хімічні властивості компонентів графіту та алмазу відрізняються. У цьому дослідженні застосовувалося хіміко-механічне полірування (CMP) для обробки поверхні Gradia окислювачем  $K_2FeO_4$ . Спочатку, субнаномасштабна шорсткість поверхні Gradia була досягнута шляхом застосування оптимізованих параметрів полірування. Потім досліджували підповерхневий шар. Встановлено, що не аморфізація, а спотворення решітки графіту та алмазу було основним механізмом його

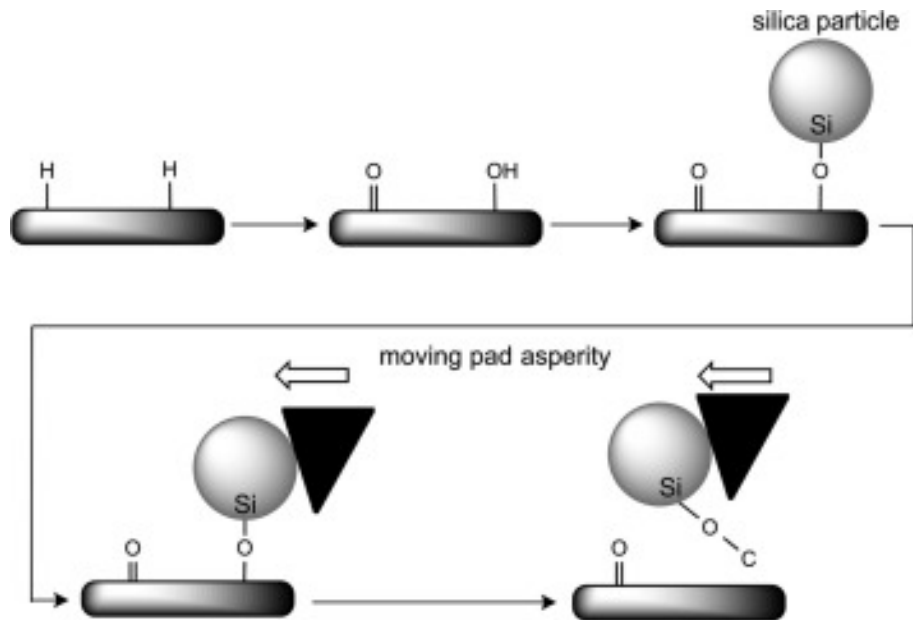
пошкодження. Атоми вуглецю утворюють різноманітні хімічні групи з окисленням гідроксидом. Хімічна активність фази графіту була вищою, ніж фаза алмазу, що призвело до більшої кількості типів реакцій і більшого відсотка продуктів. На етапі видалення матеріалу експериментальні спостереження та симуляційний аналіз показали, що алмаз з  $sp^3$ -вуглецю перетворюється на  $sp^2$ -вуглець, розм'якшується та згодом видаляється разом із графітом шляхом абразивного процесу.



**Рис. 1 – Нанорозмірний шар води багатий гідратованими іонами з товщиною, яка корелює з щільністю гідроксильних груп у кремнеземі [2]**

На дію гідроксиду звертається увага і в статті [4], де припускається, що механізм поліровки алмазної плівки відповідає механізму СМР діоксиду кремнію. В традиційному СМР іони гідроксиду в полірувальній рідині реагують з поверхневими силосановими ( $Si-O-Si$ ) зв'язками, створюючи пасивуючий шар на основі силанолу ( $Si(OH)_4$ ). Частинки кремнезему у полірувальній рідині надалі прикріплюються до гідратованих груп пасивуючого шару. Якщо полірувальна частинка виявиться достатньо шорсткою, на частинках кремнезему буде створена сила зрушення. Якщо енергія цієї зрушувальної дії буде більшою, ніж енергія зв'язку, то молекула буде видалена, що приведе до поліровки поверхні. У випадку алмаза СМР приводить до загального окислення міжфазної області, збільшення вмісту карбонілу ( $CO=$ ) і гідроксиду ( $OH$ ) на поверхні. Проводячи паралелі з гідроксильним зв'язком, який спостерігається при поліруванні  $SiO_2$ , припущено, що обрив  $OH$  полегшує зв'язування частинок кремнезему з поверхнею, як схематично показано на рис. 2. Як і у випадку з СМР  $SiO_2$ , шорстка поверхня буде створювати силу зрушення на частинках кремнезему. Оскільки міцність зв'язку  $SiO-$ ,  $OC-$  та  $-CC$  складає 800 кДж/моль, 1077 кДж/моль та 610

кДж/моль відповідно, то вважається, що при прикладенні цієї сили зв'язок СС розірветься і відбудеться поліровка поверхні алмазної плівки. Процес поліровки постійно збільшує вміст кисню на поверхні алмаза. Цікавим є те, що рівень окислення вуглецю, ймовірно, не змінюється при збільшенні вмісту кисню, то зв'язані молекулярні частинки можуть містити О і також може бути присутньою адсорбована вода.



**Рис. 2 – Механізм полірування, запропонований в статті [4], коли вологе окислення алмаза з водневими кінцевими групами полірувальною рідиною збільшує вміст карбонілу і гідроксиду (ОН) на поверхні, а останні полегшують прикріплення частинок кремнезему до поверхні**

Поверхня алмаза з кінцевими гідроксильними групами (ОН-алмаз) з хімічно функціоналізованими карбоксильними групами вигідна для силанізації. Але виготовлення високоякісної поверхні ОН-алмаза все ще утруднене. В роботі [5] ОН-алмаз отримують обробкою гідроксид-іонами в деіонізованій воді при високих напругах до 3000 В. ОН-алмаз демонструє високу інтенсивність однократно окислених  $C_I$  вуглецевих зв'язків (С–ОН і С–О–С) та непростежувані двічі окислені  $C_{II}$  вуглецеві зв'язки (С=О або О–С–О), що визначається вимірами за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії. Між тим, валентні коливання О–Н і С–О спостерігалися у інфрачервоних спектрах з перетворенням Фур'є. Крім того, силанізація досягається за рахунок 3-аминопропілтриетоксисилана (АРТЕS) на поверхні ОН-алмаза за допомогою реакції конденсації з поверхневими групами С–ОН.

В дослідженні [6] якраз і наведена ефективна дія гідрат-іонів, де для поліпшення дисперсії і сили зчеплення у полірувальному інстру-

менті поверхня алмазних зерен була модифікована шляхом нанесення шару  $\text{SiO}_2$  методом ізотермічного гідролізу. Результати свідчать, що тонка плівка  $\text{SiO}_2$  рівномірно привита до поверхні алмаза (рис. 3). Полірувальні плівки були виготовлені із застосуванням немодифікованого і модифікованого алмаза у якості абразиву на основі технології Sol-Gel для поліровки SiC-підкладок. Випробування свідчать, що полірувальні плівки із алмазними зернами, модифікованими  $\text{SiO}_2$ , мають більш високу швидкість зйому матеріалу і кращу якість полірування, аніж плівки із немодифікованими алмазними зернами. Це викликане збільшенням диспергувальної здатності зерен абразиву та покращенням зчеплення між матрицею плівки і абразивами [6].

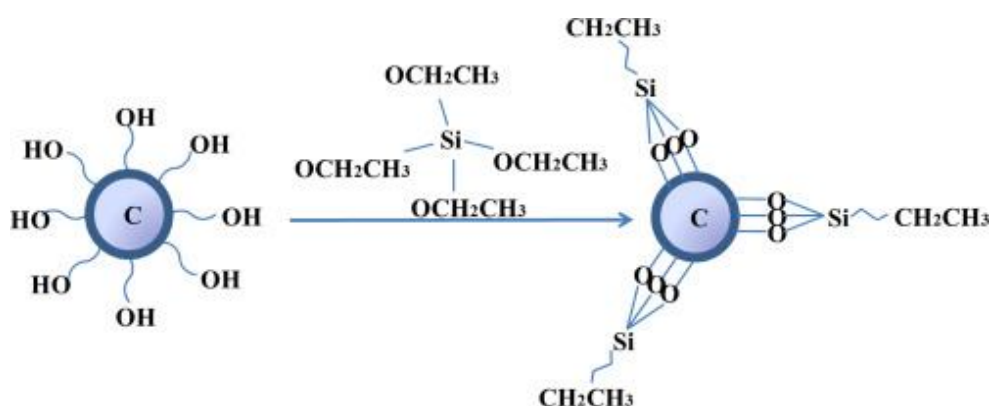


Рис. 3 – Схема утворення привитого шару  $\text{SiO}_2$  до алмазної поверхні [6]

Аналіз літературних даних свідчить про ефективну дію води та іонів гідроксилу на поверхнях PCD (мікрокристалічного MCD та нанокристалічного NCD) [1], твердого кремнезему [2], графіт/алмазного композиту (Gradia) [3], алмазної плівки [4], алмазу с кінцевими гідроксильними групами (ОН-алмаз) [5] та модифікованих алмазних зерен [6], коли наявність води та іонів змінює умови контактування при обробці та процесі модифікування поверхні зерен.

### Література

1. Xiao, Chen. Capillary adhesion governs the friction behavior of electrochemically corroded polycrystalline diamond / Chen Xiao, Liang Peng, Cyrian Leriche, Feng-Chun Hsia, Bart Weber, Steve Franklin // Carbon. – 2023. – Vol. 205, 5. – P. 345–352.
2. An, Wei-qing. Direct observation of anomalous water at the solid-liquid boundary on silica surface / Wei-qing An, Xiang-an Yue, Ji-rui Zou, Lijuan Zhang, Rong-jie Yan // Appl. Surf. Sci. – 2023. – Vol. 638, 30. – 158096.
3. Chen, Junyun. Study on incompatible mechanism in chemical mechanical polishing of the novel graphite/diamond composite / Junyun Chen,

Zihao Lin, Tianye Jin, Bing Liu, Anmin Nie // Appl. Surf. Sci. – 2023. – Vol. 641, 30. – 158500.

4. Thomas, Evan L.H. Chemical mechanical polishing of thin film diamond / Evan L.H. Thomas, Geoffrey W. Nelson, Soumen Mandal, John S. Foord, Oliver A. Williams // Carbon. – 2014. – Vol. 68. – P. 473–479.

5. Li, F.N. Fabrication of hydroxyl terminated diamond by high-voltage hydroxide ion treatments / F.N. Li, Y. Li, H.W. Bao, H.X. Wang, F. Ma // Appl. Surf. Sci. – 2023. – Vol. 622, 15. – 156909.

6. Lu, Jing The effects of SiO<sub>2</sub> coating on diamond abrasives in sol-gel tool for SiC substrate polishing / Jing Lu, Yongchao Xu, Yunhe Zhang, Xipeng Xu // Diamond and Related Mat. – 2015. – Vol. 76. – P. 123–131.

*Лавріненко В.І., Полторацький В.Г., Петасюк Г.А.*

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, Київ,

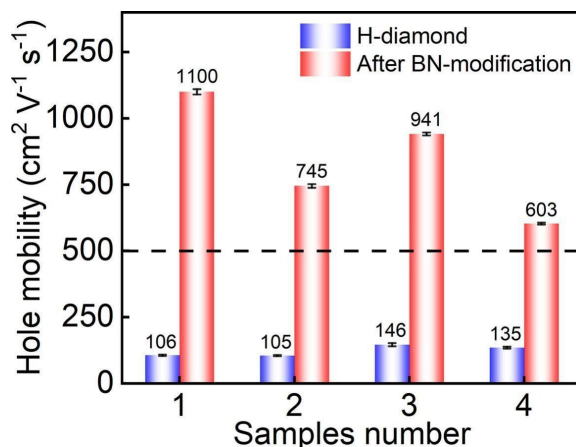
*Солод В.Ю., Гумаров О.В.* Дніпровський державний  
технічний університет МОН України, Кам'янське, Україна

## **СУЧАСНІ РОЗРОБКИ В НАНЕСЕННІ ТА ЗАСТОСУВАННІ сBN-ПОКРИТТІВ НА АЛМАЗНУ МАТРИЦЮ**

У попередній роботі [1] нами приділена переважна увага на сучасних публікаціях, пов'язаних із нанесенням на абразивні зерна саме борнітридних покриттів, причому переважно h-BN. В даному повідомленні нами звернена увага на покриття з нітридів бору на алмазних матрицях, причому переважно с-BN. Ми зупинилися на сучасних розробках 2023–2024 рр., адже цей напрямок останнім часом є важливим і актуальним.

В останні десятиліття значні зусилля були спрямовані на дослідження транспортних властивостей алмазу з водневими кінцями (Н-алмазу), однак досягнення його високої рухливості дірок залишається проблемою. В роботі [2] запропоноване збільшення рухливості дірок Н-алмазу шляхом модифікації кластерами нітриду бору (BN). Аморфні кластери BN були нанесені на високоякісні Н-алмазні поверхні за допомогою магнетронного розпилення. Модифікований Н-алмаз демонструє надвисоку рухливість дірок  $1100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , що в 10 разів вище, ніж у Н-алмазу до модифікації BN (рис. 1). Для нас важливим є інше, адже Н-алмаз, модифікований BN, також демонструє виняткову стійкість до високих температур і чудову термічну стабільність завдя-

ки ефекту пасивації BN. При 380 К він все ще зберігає рухливість дірок  $385 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Навіть після відпалу при 350 К протягом більше 8 годин немає помітних змін у його транспортних властивостях носія.



**Рис. 1 – Підвищення рухливості дірок в Н-алмазі при різних варіантах його BN-модифікування [2]**

В статті [3] розглядалися тонкі плівки турбостратного нітриду бору (t-BN) і кубічного нітриду бору (c-BN) вирощені на В-легованому полікристалічному та монокристалічному алмазі. Аналіз просвічуючої електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю показав, що тонкі плівки кубічного нітриду бору складаються із суміші фаз c-BN і t-BN, причому c-BN є домінуючою фазою. Ця робота дає інформацію про характеристики c-BN і алмазних інтерфейсів і має важливе значення для управління температурою при їх застосуванні.

В роботі [4] досліджена придатність гетеропереходів алмаз/c-BN для високочастотних і потужних пристроїв. Ключові величини зміщення смуги та поляризації заряду на межі досліджені для різних кристалографічних орієнтацій [(110), (111) або (100)], зв'язку (C–B або C–N) і підкладок (алмаз або c-BN). Результати показують, що як (111), так і (100) структури з полярними поверхнями розділу, ймовірно, є вирівнюванням типу I з екстремумами алмазної провідності та валентної зони, вкладеними в заборонену зону c-BN, тоді як неполярна (110) може утворювати тип II, оскільки валентна зона c-BN зміщена вниз значно нижче. Зсув валентної зони оцінюється приблизно в 0,2–0,55 eV і 1,2–1,3 eV для типів I і II, відповідно, лише з помірною залежністю від порядку укладання шарів і розриву зв'язку. Структури (111) і (100) також демонструють поризацію сумарного заряду у вузькій області на межі розділу. Встановлено, що зв'язок C–B і C–N з дефіцитом електронів і збагаченням електронів індукує перерозподіл заряду, що призводить до по суті двовимірного шару негативної та позитивної

поляризації. Тобто, завдяки прогнозованому вирівнюванню смуг, придатному для утримання носіїв, а також можливості модуляції та поляризаційного легування, гетероструктури алмаз/с-BN є перспективними для високопродуктивних електронних пристроїв з високопровідним двовимірним каналом.

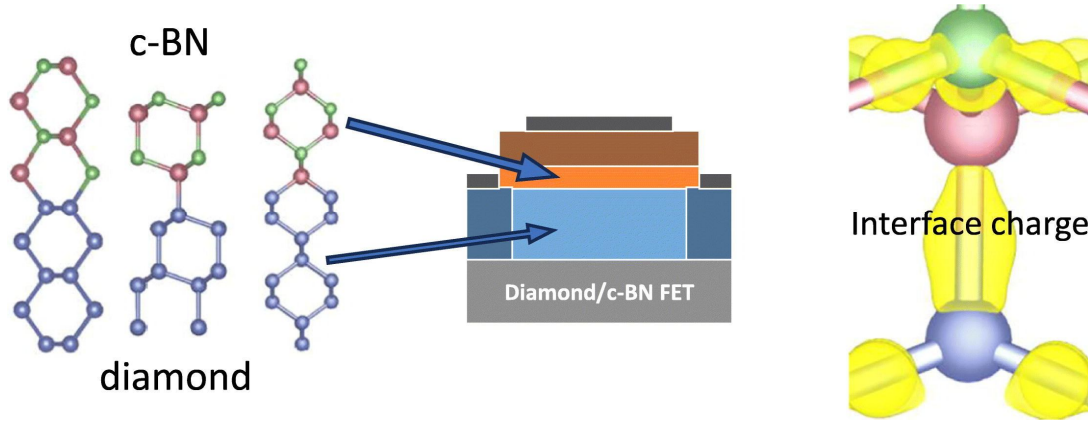


Рис. 2 – Схематичне представлення гетеропереходу с-BN/алмаз [4]

В роботі [5] розглянуті механічні і трибологічні властивості багатошарового композиційного покриття сBN/NCD (кубічний нітрид бору та нанокристалічний алмаз). Випробування на тертя і знос (рис. 3) засвідчили, що зносостійкість багатошарового композиційного покриття сBN/NCD пов'язана з залишковими напруженнями і в'язкістю руйнування, коефіцієнт тертя зберігає стабільність біля 0,12–0,15.

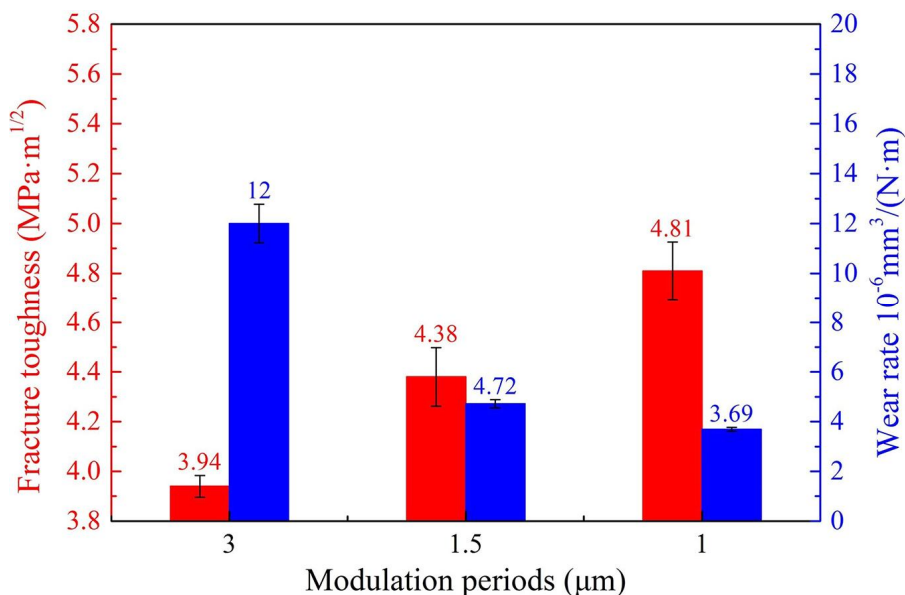


Рис. 3 – Механічні характеристики покриття сBN/NCD [5]

Тобто, аналіз літературних даних свідчить про ефективну дію модифікування BN поверхні алмазів та позитивну дію плівок с-BN на поверхні алмазних матриць.

## Література

1. Лавріненко, В.І. Сучасні розробки в нанесенні та застосуванні антифрикційних та захисних бор-нітридних покриттів на абразивні зерна для абразивної обробки / В.І. Лавріненко, В.В. Скрябін, В.Г. Полторацький, Г.А. Петасюк, В.Ю. Солод, І.С. Кашинський, О.В. Гумаров // Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р., м. Київ. – К. : АТМ України, 2024. – С.73–77.
2. Yang, Mingyang. Achieving ultrahigh hole mobility in hydrogen-terminated diamond via boron nitride modifications / Mingyang Yang, Youwang Hu, Junfeng Cui, Yingying Yang, Mengting Qiu, Yunxiang Lu, Yi Shen, Zhenglin Jia, Kazuhito Nishimura, Chun Tang, Nan Jiang, Qilong Yuan // *Diamond and Related Mat.* – 2024. – Vol. 144. 111007.
3. Guzman, Erick. Optical and acoustic phonons in turbostratic and cubic boron nitride thin films on diamond substrates / Erick Guzman, Fariborz Kargar, Avani Patel, Saurabh Vishwakarma, Dylan Wright, Richard B. Wilson, David J. Smith, Robert J. Nemanich, Alexander A. Balandin // *Diamond and Related Mat.* – 2023. – Vol. 140, Part A. – 110452.
4. Mullen, Jeffrey T. Electronic properties of c-BN/diamond heterostructures for high-frequency high-power applications / Jeffrey T. Mullen, James A. Boulton, Minghao Pan, Ki Wook Kim // *Diamond and Related Mat.* – 2024. – Vol. 143. – 110920.
5. Tian, Shuai. Effect of the modulation periods on the mechanical and tribological properties of cBN/NCD multilayer composite coating / Shuai Tian, Feng Xu, Zhenyu Ma, Qian Zhou, Yanchao Zhao, Zheng Li, Dong Wang, Guang Zeng, Dunwen Zuo // *Diamond and Related Mat.* – 2023. – Vol. 132. – 109628.

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

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ З ОРГАНІЗАЦІЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ВИГОТОВЛЕННЯМ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Основною тезою стандартів управління залишається «процесний» підхід. Однак посилено вимоги по вимірюванню функціонування процесів: оперативний моніторинг процесів виділено окремим підрозді-

лом. Організація збору даних функціонування процесів (особливо істотних, «ризикованих» процесів), вимірювання параметрів аналізування відхилень, прийняття рішення коли необхідно виконувати коригування, подальший контроль – всі ці завдання необхідно вирішувати при розробці та впровадженні системи управління. Варто зауважити, що всі заходи з регулювання несуть в собі фінансові витрати, при цьому основне правило управління, що система повинна бути економічна. Таким чином, необхідно визначити оптимальний збір даних про процеси, які б репрезентували стан системи з прийнятною величиною невизначеності.

Відповідно до визначення, система розглядається як сукупність процесів. При цьому, важливі як самі процеси так і зв'язки між ними. Процеси, як внутрішні так і зовнішні, в кінцевому рахунку, спрямовані на виконання циклу Демінга (життєвого циклу продукції).

У статті проаналізовано принципи впровадження системи статистичного управління (SPC) при виконанні зварювальних робіт.

Система управління виробництвом, що розглядається через призму процесного підходу.

Для визначення видів мінливості процесу викидів рекомендовано використовувати контрольні карти Шухгарта, описані в стандарті ISO 8258. Як зазначено, теорія контрольних карт розрізняє два види мінливості. Перший вид – ором різноманітних причин, присутніх постійно, які нелегко або неможливо виявити. Кожна з таких причин становить дуже малу частку загальної мінливості і жодна з них не значима сама по собі. Проте, сума цих причин вимірна, і передбачається, що ця сума, яка характеризує мінливість, внутрішньо властива процесу. Виняток або зменшення впливу звичайних причин вимагає управлінських рішень і виділення ресурсів на поліпшення процесів системи.

Другий вид – реальні зміни в процесі. Вони можуть бути наслідком деяких обумовлених причин, які не властиві процесу внутрішньо, і можуть бути усунені, принаймні – теоретично. Ці виявлені причини розглядаються як «невипадкові» чи «особливі» причини зміни. До них можуть бути віднесені недостатня однорідність процесів, недостатня кваліфікація персоналу, неправильне виконання процедур і т. д.

Мета контрольних карт виявити неприродні зміни в даних з повторюваних процесів і дати критерії для виявлення відсутності статистичної керованості. Процес знаходиться в статистично керованому стані, якщо мінливість викликана тільки випадковими причинами. При визначенні цього прийнятного рівня мінливості будь-яке відхилення

від нього вважають результатом дії особливих причин, які слід виявити, виключити або послабити.

Завдання статистичного управління процесами – забезпечення і підтримування процесів на прийнятно і стабільному рівні з гарантією, відповідності параметрів викидів і скидів встановленим вимогам. Головний статистичний інструмент, використовуваний для цього – контрольні карти, що є графічним способом надання і зіставлення інформації, заснованої на послідовності вибірок, що відображають поточний стан процесу.

Розглянуто особливості випадкових процесів та методи визначення їхніх статистичних характеристик, що є важливим моментом при дослідженнях властивостей технічних об'єктів. Спектральний аналіз стаціонарних випадкових процесів може бути проведений на підставі статистичних процедур або методом аналізу Фур'є, особливість якого полягає в тому, що обчислювальні процедури реалізуються для наближення неперіодичних функцій, використовуваних при обробці сигналів, в яких виділяється детермінована складова.

*Лопата О.В.* Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренко НАН України,  
*Лопата В.Н.* Інститут електрозварювання  
імені Є.О. Патона НАН України, Київ,  
*Солових Є.К., Забойкіна Н.П.* Центральноукраїнський  
національний технічний університет,  
Кропивницький, Україна

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ПРИ РЕМОНТІ СПЕЦТЕХНІКИ**

Розвиток та впровадження ремонтних технологій стримується відсутністю спеціалізованого обладнання та матеріалів для ремонтних робіт, низькою їх якістю. Тому особливу увагу слід приділяти оснащенню ремонтного виробництва методами, технологіями та обладнанням для відновлення та зміцнення деталей [1, 2].

Різноманітність типів спецтехніки, що експлуатується у будь-яких кліматичних умовах, та різноманітність виконуваних нею завдань передбачає необхідність постійно підтримувати працездатність та прагнути при цьому до підвищення її ресурсу за рахунок застосування

прогресивних технологій ремонту та відновлення. Зростання цін на спецтехніку зарубіжного виробництва, дефіцит у її запасних частинах та їх висока вартість, перевитрата дорогих запасних частин з легованого металу для заміни зношених деталей – головна проблема ефективного використання машин, яка змушує по-новому підійти до стратегії експлуатації та збереження парку спецтехніки вітчизняного виробництва, а також ролі її ремонту, що включає комплекс заходів щодо відновлення та підвищення ресурсу деталей.

З аналізу причин зносу деталей двигунів та ходової частини спецтехніки зроблено висновок, що в переважній більшості випадків розміри робочих поверхонь деталей можна відновити нанесенням зносостійких, корозійностійких та інших покриттів зі спеціальними властивостями. Нанесення покриттів може дозволити не тільки відновити геометричні розміри деталей, а й забезпечити їх експлуатаційні властивості та продовжити ресурс. Однак відсутність практичних рекомендацій щодо поверхневого зміцнення, відновлення та підвищення ресурсу деталей спецтехніки шляхом нанесення покриттів обмежує їх використання на ремонтних підприємствах України.

Найбільшого поширення з числа відомих способів відновлення зношених поверхонь деталей набули різні способи наплавлення та газотермічного напилення [2]. Однак ці способи мають ряд недоліків, які обмежують сферу їх застосування. При існуючій економічній ситуації в Україні удосконалення існуючих та розробка простих в експлуатації та дешевих технологій відновлення та зміцнення деталей дозволить збільшити їх ресурс та значною мірою зменшити постачання запасних частин по найбільш дорогих, металомістких та дефіцитних деталях, у тому числі імпортного виробництва, для заміни зношених деталей та втрат від простоїв спецтехніки.

Таким чином, найважливішим напрямком у вдосконаленні ремонту деталей спецтехніки є науково-обґрунтований пошук прогресивних та менш витратних методів відновлення та підвищення надійності, довговічності та ресурсу її деталей. Аналіз методів нанесення покриттів показує, що їхнє вдосконалення має реалізовуватися з урахуванням наступних основних положень:

- розплавлення основи в процесі нанесення шару небажано, оскільки тягне зміну хімічного складу і властивостей нанесеного шару;
- тепловий режим нанесення зносостійких шарів на поверхні деталей різних розмірів та форм повинен забезпечувати сприятливий характер розподілу залишкових напружень. Зокрема, у нанесеному шарі та в

зоні з'єднання його з основою бажано утворення залишкові напружен-  
ня стиску, які сприяють підвищенню опору втоми;

- тривалість процесу нанесення покриттів повинна бути мінімальною, щоб структура зносостійкого покриття, що наноситься, не сприймала небажаних змін.

При виборі способу відновлення необхідно враховувати основні умови формування якісних покриттів: частка участі основного металу в покритті має бути близькою до нуля; термічний вплив на деталь повинний повністю запобігати фазовим і структурним перетворенням в основному металі; у зоні з'єднання не повинні мати місце процеси релаксаційного характеру, що здатні змінити її структуру та фазовий склад. З аналізу та узагальнення інформації про способи відновлення метод електродугового напилення відповідає вищезазначеним положенням [3, 4].

Останнім часом електродугове напилення (ЕДН) знаходить широке застосування. Це зумовлено багатьма перевагами методу: простотою і доступністю обладнання, що дозволяє створювати покриття, які за якістю не поступаються покриттям, нанесеним плазмовим і детонаційним методами; більш високою тепловою ефективністю, що досягає 57% порівняно з 13 і 17% при газополуменовому (ГПН) та плазмовому напиленні; високою продуктивністю (у 3–4 рази вищою, ніж при ГПН); доступністю джерела енергії для плавлення металу; отримання покриттів з більшою міцністю зчеплення з зміцнюємою (відновлюємою) поверхнею, ніж при ГПН. Простота та легкість реалізації ЕДН сприяють його широкому впровадженню. Методом електродугового напилення наноситься більше 75% покриттів. Це пов'язано з тим що, серед способів газотермічного напилення, він є найдешевшим і найпростішим методом нанесення покриттів, який не вимагає застосування високовартісного обладнання та має технологічну гнучкість застосування до різних типорозмірів деталей. Цим способом можна відновлювати близько 60% найменшуваних деталей, забезпечуючи їх зносостійкість та ресурс на рівні нових [3, 4].

Незважаючи на велику кількість розробок із електродугового напилення, в даний час дослідження з удосконалення цієї технології та обладнання активно розвиваються, причому вони набули спрямованість на активування процесу напилення з використанням різних прийомів, методів, пристроїв. Підвищення ресурсу відновлюваних та ремонтваних деталей електродуговим напиленням покриттів можливо шляхом удосконалення конструкції апарату для ЕДН та підвищення захисно-енергетичного рівня факелу розпилу. Методи активування

процесу напилення – основа для вдосконалення ЕДН – технології та обладнання, впровадження технологічних процесів відновлення та зміцнення деталей. З прийомів активації найбільш доцільним є застосування таких, які інтенсифікують процеси теплообміну в системі «факел-частка», збільшують динамічні параметри частинок, дозволяють зменшити розмір частинок при розпилюванні дротів. Найбільш універсальним і прийнятним є спосіб електродугового напилення з активуванням потоку розпилювання продуктами згоряння пропаноповітряної суміші [5–7].

Більшість існуючих підходів до вдосконалення та управління технологією нанесення покриттів ЕДН засновано на отриманні заданого складу та структури покриття. При цьому не враховується і, як правило, ігнорується еволюція фазово-структурного стану поверхневого шару деталі в процесі нанесення покриттів, а також під впливом зовнішніх і внутрішніх впливів, що має місце у реальних умовах експлуатації.

Нами пропонується новий підхід до вдосконалення технології відновлення деталей спецтехніки, і зокрема деталей двигунів та ходової частини, електродуговим напиленням, в основі якого лежить створення та цілеспрямоване кероване використання фазово-структурних перетворень при нанесенні покриттів. Для реалізації пропонованого підходу було запропоновано використовувати для напилення покриттів матеріали, головною особливістю яких є здатність до певних фазових перетворень та структурних змін як на стадії нанесення та обробки покриттів, так і на стадії експлуатації; які б дали можливість забезпечити поліпшення фізико-механічних і експлуатаційних властивості, отже і ресурс деталей [5, 6].

Таким чином, основні зусилля вдосконалення процесу електродугового напилення повинні бути спрямовані на вирішення завдання управління технологією напилення, зокрема параметрами газотермічного потоку (швидкістю і температурою газу та матеріалу, що розпилюється, коефіцієнтом зосередженості потоку), складом і властивостями напилюваного матеріалу та несучого середовища, конструктивними параметрами обладнання, способами підготовки поверхні під напилення та методами обробки цих поверхонь після нанесення покриттів.

## **Література**

1. Покрyтия и их использование в технике // Прочность материалов и конструкций. – К. : Академперіодика, 2006. – С. 981–1074.
2. Ющенко, К.А. Инженерия поверхности / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.Н. Корж. – К. : Наукова думка, 2007. – 559 с.

3. Brusilo, Y.V. Investigation of properties of coatings deposited by different arc spraying methods / Y.V. Brusilo, A.E. Cherepko // Наукоємні технології. –2013. – №4(20). – С. 366–371.

4. Lopata, A. Investigation of the properties of coatings obtained by electric arc spraying / A. Lopata, I. Smirnov, M. Holovashchuk, V. Lopata // Problems of Tribology. – 2023. – Vol. 28, № 1. –107-73-80.

5. Брусило, Ю.В. Удосконалення технології відновлення деталей авіаційної наземної техніки шляхом керування технологічними параметрами електродугового напилення (ЕДН), складом матеріалу і конструкцією обладнання для ЕДН / Ю.В. Брусило, Р.М. Салімов, Т.В. Ворона // Инженерия поверхности и реновация изделий : мат.15-й Международ. науч.-техн. конф., 1-4 июня 2015, Затока Одесской области. – К. : АТМ України, 2015. – С. 24–25.

6. Lopata, O. Use of steel gas thermal coatings to increase wear resistance of parts / O. Lopata, I. Smirnov, N. Vihilianska, V. Lopata, V. Kulyshskyi // Scientific Journal of TNTU. – 2022. – Vol. 105, № 1. – С. 108–117.

7. Ageev, M. The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. Central Ukrainian Scientific Bulletin / M. Ageev, S. Dovzhuk, V. Nikolaychuk / Technical Sciences. – 2019. – Col.1(32). – P.114–123.

*Лопата Л.А.* Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренко НАН України, Київ  
*Солових А.Е., Катеринич С.Є.* Центральноукраїнський  
національний технічний університет,  
Кропивницький, Україна

## **ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ШВИДКО ЗНОШУЮТЬСЯ, ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ ПРИПКАННЯМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Більшість деталей двигунів та ходової частини спецтехніки експлуатуються до гранично допустимого зносу та подальшого відновлення не підлягають. Відомі способи відновлення із застосуванням наплавлення або плазмового напилення трудомісткі, не забезпечують необхідної якості деталі, енергоємності та економічно недоцільні. [1, 2].

Розроблено принцип, теоретичні та технологічні основи відновлення деталей машин покриттями електроконтактним припіканням порошкових матеріалів (ЕКПП), що мають підвищену зносостійкість [3]. Суть принципу – електроконтактне припікання полягає у нанесенні на поверхню деталі шару порошкового матеріалу та його подальше спікання та припікання при впливі зовнішнього тиску. При ЕКПП домінуючими є процеси, які відбуваються як при гарячому пресуванні, так і при зварюванні тиском. Процес електроконтактного припікання гарантує збереження у покритті всього комплексу властивостей, властивих вихідній порошковій системі.

Електроконтактний спосіб є найбільш перспективним способом відновлення та зміцнення, так як він відноситься до способів з мінімально необхідним нагріванням, виключаючи термічне деформування відновлюємих (зміцнюваних) деталей. Зона термічного впливу струму на деталь внаслідок малої тривалості нагрівання становить 0,02–0,3 мм. Відсутність рідкої фази при нанесенні покриттів значно розширює технологічні можливості процесу, що дозволяє збільшити товщину зносостійкого шару до 3–7 мм [3].

У цілому процес електроконтактного припікання характеризується використанням електричного струму силою до 8–30 кА; вторинною напругою 1–6 В; тиском до 100 МПа, часом імпульсу (паузи) 0,04–0,2 с [3].

Особливістю ЕКПП є одержання зносостійких покриттів з мінімальними (до 0,2 мм) припусками на подальшу механічну обробку або її виключення за рахунок поєднання припікання та поверхнево-пластичного деформування в одному процесі [3].

Покриття, отримані електроконтактним припіканням порошкових матеріалів, мають практично 100% щільність. Міцність зчеплення композиції "основа-покриття" (180–200 МПа) забезпечує надійну роботу деталей у найекстремальніших умовах. Товщина покриттів може становити 0,10–0,03 мм та більше. Твердість покриттів визначається твердістю його матеріалу, яка зберігає свою величину в матеріалі покриття і може знаходитися в межах 25–62 HRC. Матеріалом покриттів можуть бути як легкоплавкі, так і тугоплавкі важкодеформовані твердосплавні порошкові матеріали (виняток становлять неелектропровідні). Ресурс роботи деталей збільшився – у 2–3 рази [3].

При розробці технології відновлення швидкозношуваних деталей двигунів бралися до уваги специфічні особливості виробів, що зміцнюються: конструкція, властивості матеріалу, необхідні розміри покриття та інші. Для кожної технології є своя оптимальна схема і послі-

довність технологічних операцій, тобто свій технологічний варіант. Технологічний процес відновлення деталей методом електроконтактного припикання порошкових матеріалів складається з наступних операцій: підготовка порошкових матеріалів; очищення; вхідний контроль деталі (дефектація); попередня механічна обробка; попереднє формування порошкового матеріалу (напилення або з використанням пластифікаторів); контроль напилених поверхонь; електроконтактне припикання покриттів; зачистка (зенкерування) отворів, якщо вони є; остаточне шліфування відновлених поверхонь; контроль відновлених поверхонь; консервація виробів для зберігання. На рис. 1 представлені відновлені деталі, а у табл. 1 – фізико-механічні властивості нових деталей і після відновлення.



**Рис. 1 – Відновлені деталі двигуна:**

*a* – розподільний вал; *б* – палець поршневий. Матеріал покриття: суміш порошків сплавів 70% ПГ-СР4 та 30% ФХ-800

**Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості відновлених і нових деталей**

Деталь		Матеріал	Міцність зчеплення, МПа	Середнє значення зносу, мм
Нова	Вал розподільний	сталь 45	–	0,05–0,15
	Палець поршневий	сталь 40Х	–	0,05–0,10
Відновлена	Вал розподільний		220	0,01–0,02
	Палець поршневий		200	

Таким чином, пропонується технологія електроконтактного припикання дозволяє збільшити зносостійкість відновлених і зміцнених де-

талей двигунів та їх строк служби у 2–3 рази. При цьому покриття отримані електроконтактним припиканням порошкових матеріалів практично безпористі з міцністю зчеплення 180–220 МПа.

### **Література**

1. Ющенко, К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.Н. Корж. – К. : Наукова думка, 2007. – 559 с.
2. Лопата, Л.А. Основи концепції вирішення проблеми зміцнюючих технологій / Л.А. Лопата, І.Р. Качинська, Є.К. Солових // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті : мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26-27 березня 2024 р., м. Київ. – К. АТМ України, 2024. – С. 86–89.
3. Лопата, Л.А. Ресурсо-енергосберегающая технология восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования электроконтактным припеканием порошковых материалов / Л.А. Лопата, Н.В. Николайчук, Т.И. Ивченко // Підвищення надійності машин і обладнання : мат. 1-ї між народ. наук.-практ. конференції, 17–19 квітня 2019 р., м. Кропивницький. – Кропивницький, ЦНТУ, 2019 р. – С. 46–50.

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

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**

Протягом останніх десятиліть композиційні матеріали широко використовуються як заміник традиційних конструкційних металів і сплавів. Зокрема, композиційний матеріал, що армований вуглецевим волокном, лідирує в технологіях аерокосмічної, оборонної та автомобільної промисловості завдяки своїм механічним властивостям, таким як велике співвідношення міцності по відношенню до маси, покращені показники втоми при експлуатації деталі, висока стійкість до корозії, пошкоджень та ударів [1].

Механічне оброблення КМ є складним процесом внаслідок притаманній неоднорідності матриці та волокон (двофазовість), абразивності

армуючих волокон та анізотропній структурі. На додаток до негативних механічних властивостей дані матеріали, включаючи вуглепластик, мають низьку теплопровідність та питому теплоємність, що викликає надмірне підвищення температури в процесі механічного оброблення та призводить до розм'якшення матеріалу та термічної деградації. Таким чином, оброблення КМ пов'язане з небажаними дефектами отриманої деталі та підвищеним зносом різального інструмента [2].

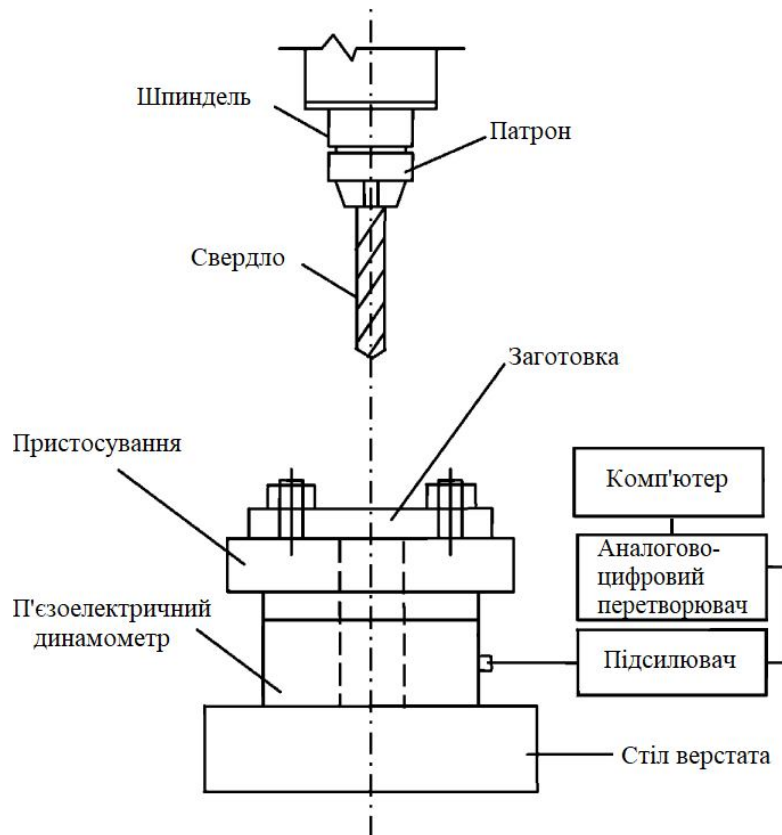
Оброблюваність КМ можна дослідити за допомогою: осьової сили різання, крутного моменту, шорсткості обробленої поверхні, розшарування отвору, ступеня нерозрізаних волокон та зносу інструмента [3]. На ці параметри впливають режими різання (подача та швидкість), властивості матеріалу заготовки та матеріалу інструмента. Інтенсифікація даних режимів призводить до збільшення сили різання, крутного моменту та підвищення зносу інструмента. У той же час більш висока швидкість різання дозволяє забезпечити кращу якість отворів.

Поява нових КМ з унікальним поєднанням властивостей, які перевершують властивості традиційних конструкційних матеріалів, потребує прогнозування параметрів якості при свердлінні даних матеріалів для визначення оптимальних режимів їх оброблення.

З огляду літературних джерел [1–5] визначальними параметрами якості процесу оброблення отворів в деталях з вуглепластику обрано розшарування, шорсткість отвору, які визначаються непрямим методом за величиною осьової сили різання.

При проведенні експериментальних досліджень [4] використовували як оброблювальний матеріал вуглепластик із вмістом вуглецевого волокна 50% з орієнтацією 0/90°. Матричним матеріалом була епоксидна смола LY564 і затверджувач HY 564 виробництва Huntsman Co. Загальна товщина композиційного матеріалу становила  $8 \pm 0,1$  мм та містила 32 шари товщиною 0,25 мм. Вуглепластик був виготовлений за допомогою технології трансферного формування (RTM – Resin Transfer Molding). Заготівкою був лист матеріалу  $160 \times 160 \times 8$  мм, що розрізаний у формі брусків шириною 20 мм для подальшого оброблення.

Дослідження процесу свердління отворів з вимірюванням осьової сили та визначення її значень виконували за допомогою експериментальної установки, схема якої представлена на рис. 1.



**Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження процесу свердління деталей із вуглепластику**

Для обробки результатів експериментальних досліджень, що отримані з використанням експериментальної установки, з метою отримання математичних залежностей параметрів якості оброблених поверхонь отворів використано метод групового врахування аргументів (МГВА). Основна перевага даного методу полягає в тому, що він не вимагає задання моделі в явному вигляді. Індуктивні методи моделювання ґрунтуються на принципі самоорганізації і дозволяють отримати адекватну модель за малим об'ємом початкових даних. З використанням даного методу розроблено математичні залежності осьової сили від кількості обертів, подачі та кута при вершині свердла  $P = f(n, S, \varphi)$ , коефіцієнта розшарування від осьової сили  $K_{\text{розш}} = f(P)$  та середньоквадратичної шорсткості від осьової сили  $Ra = f(P)$ .

Розроблені математичні залежності параметрів якості поверхонь отворів (розшарування і шорсткості) зручно використовувати для прогнозування цих параметрів при свердлінні отворів у деталях з вуглепластику та як обмеження в загальній математичній моделі процесу свердління при розв'язанні задачі оптимізації. При цьому ці математичні залежності є адекватними при наступних режимах оброблення: кількість обертів  $n$  від 1250 до 4000 об/хв та подача  $S$  від 50 до 800 мм/хв.

## **Висновки.**

На основі аналізу процесу свердління отворів у деталях з вуглепластику встановлено, що критеріальними параметрами якості процесу є коефіцієнт розшарування і шорсткість оброблених поверхонь, які можна визначити непрямим методом за величиною осьової сили різання.

Для проведення експериментальних досліджень запропонована схема установки, що дозволяє отримати необхідну інформацію для створення математичних моделей параметрів якості при свердлінні отворів.

В результаті оброблення даних експериментальних досліджень отримано математичні залежності осьової сили, коефіцієнта розшарування та шорсткості обробленої поверхні від режимів та умов різання, що дозволяють прогнозувати значення цих параметрів у режимі реального часу та сформуванню математичну модель процесу свердління отворів у вуглепластику, що дозволяє розв'язати задачу оптимізації даного процесу.

## **Література**

1. Матошин, О.В. Система автоматизованого керування процесом свердління отворів у деталях з вуглепластику / О.В. Матошин, С.П. Вислоух // Вчені записки Таврійського нац. ун-ту імені В.І. Вернадського. Серія : Техн. науки. – 2024. –Том 35 (74), №1, Ч. 1. –С. 237-244.
2. Zhu, W. Optimization of CFRP drilling process: a review / W. Zhu et al. / The Inter. J. of Advanc. Manuf. Technol. – 2022.
3. M. Altin, Karataş. Gökkaya H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials / Karataş M. Altin, H. Gökkaya // Defence Technol. – 2018. – Vol. 14, №4. – P. 318–326.
4. Shahrajabian, H. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite / H. Shahrajabian, M. Farahnakian // Inter. J. of Prec. Eng. and Manuf. – 2013. –Vol. 14, №10. – P. 1829–1837.
5. Lupkin, Borys. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials / Borys Lupkin, Oleksii Andrieiev, Kateryna Maiorova, Victor Antonyuk, Sergii Vysloukh // Eastern-European J. of Enterprise Technol. – 2023. – №3/1 (123). – P. 59–67.

## **ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ СПРАЦЬОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАЛЬНИКА ГН-2**

Газополуменеве напилення та наплавлення є відносно дешевими технологіями обробки з огляду на невисоку вартість апаратури і простоту експлуатації. Газопорошкове наплавлення покриттів виконують пальником серійного виробництва мод. ГН-2. Пальник є інструментом переносного типу, призначеним для газопорошкового наплавлення самофлюсівних твердих сплавів та інших композицій для відновлення спрацьованих або зміцнення поверхонь нових деталей машин.

З використанням пальника ГН-2 можна отримати шар покриття товщиною 0,3–2,0 мм. Для напилення та наплавлення широко використовують порошки сплавів системи Ni-Cr-B-Si з розміром часток 40–100 мкм. Для роботи пальника необхідні кисень та ацетилен (пропан-бутан).

Технології відновлення та зміцнення з використанням пальника ГН-2 застосовуються в ремонтному виробництві багатьох галузей промисловості. Доцільно відновлювати деталі, що працюють в умовах інтенсивного абразивного спрацювання, зокрема, деталі обладнання гірничо-рудних підприємств, підприємств будівельної промисловості. Завдяки наплавленню твердість поверхневого шару покриття становить 55–64 HRC<sub>e</sub>.

В Житомирській політехніці відпрацьовано технологію напилення на розробленій в лабораторії газотермічних покриттів і зварювання механічної інженерії установці КНПА-1,2М зношених поверхонь циліндричних деталей. Процес напилення з одночасним оплавленням виконують пальником ГН-2.

Розроблено також технологію газопорошкового наплавлення з одночасним оплавленням зносостійких покриттів на деталі із чавунів і сталей. Наприклад, для наплавлення деталей запірної арматури (тарілки, ущільнюючі кільця, сідла).

Пальник ГН-2 ефективно застосовується для наплавлення покриттів при відновленні газорозподільних валів двигунів внутрішнього згоряння та деталей тракторної техніки (вилка перемикачів передач трактора ПМЗ-6Л(М) тощо), а також для швидкоspraцьовуваних деталей обладнання з виготовлення фарб, шпаклівок, затірок різної густини.

Газопорошкове напилення та наплавлення покриттів пальником ГН-2 дає можливість наносити покриття на спрацьовані ділянки деталі прицільно. Коефіцієнт використання матеріалу напилення знаходиться в межах 0,7–0,9. Технології відновлення та зміцнення напиленням із наступною механічною обробкою забезпечують показники шорсткості у межах  $Ra$  1,25–2,50 і точність розмірів по 6–8 квалітети.

*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, Україна

## **ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПІДГОТОВКИ ТА ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ НА МОРФОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКУ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ, ВІДПОВІДАЛЬНІ ЗА РОЗВИНУТІСТЬ ПОВЕРХНІ ТА РІЗАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЗЕРЕН**

Високоякісні однорідні порошки синтетичного алмазу застосовують при розробці методів технологічного управління якістю поверхні та їх отримання для виробництва сучасних абразивних інструментів, які необхідні при металообробці поверхневого шару деталей машин.

Властивості порошку формуються в процесі синтезу, екстракції та сортування різними методами в тому числі при застосуванні попередньої підготовка та флотаційного розділення.

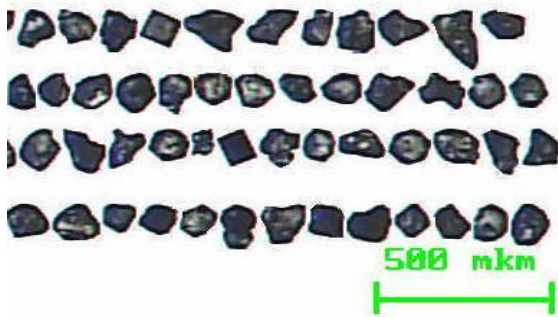
Відомо, що морфометричні характеристики порошку впливають в значній мірі на міцність закріплення зерен порошку в матриці робочого шару інструменту та на його різальну спроможність.

Мета даної роботи – дослідження на кількісному рівні зміни морфометричних характеристик синтетичних алмазних порошків при застосуванні попередньої обробки та флотаційної сепарації.

Досліджено алмазні порошки марки АС20 з зернистістю 100/80 (система Ni-Mn-C); вихідний порошок (№ 1), продукти флотаційного розділення на пінний (продукти № 2, 6) та камерний (продукти № 3, 7), отримані без застосування (продукти № 2, 3) та після застосування (продукти № 6, 7) попередньої хімічної обробки.

За допомогою приладу DiaInspect.OSM визначено морфометричні характеристики: (мінімальний ( $F_{min}$ , мкм) та максимальний ( $F_{max}$ , мкм) діаметри Фере, Фере-подовження ( $F_{el}$ ), еліптичність, ( $E$ ) шорсткість

проекції зерна ( $Rg$ ), Зазначені характеристики відображають розміри ( $F_{max}$ ,  $F_{min}$ ) та форму ( $E$ ,  $F_{el}$ ) зерен. Опосередковано-аналітичними методами визначали показник зовнішньої питомої поверхні ( $F_{зпш}$ ,  $m^2/kg$ ), кількість різальних кромок ( $n$ , шт.) і середнє значення кутів їх загострення ( $\phi$ , град.).



**Рис. 1 – Фрагмент Dialnspect-фотографії зерен дослідженого вихідного порошку марки АС20 зернистістю 100/80**

Встановлено, що порошки всіх продуктів представлені різноманітними геометричними формами проекції, найбільша кількість зерен порошку (79,7–81,7%) має проекцію овалоподібної форми, формупрямокутника та трапеції (рис. 1).

Морфометричні характеристики порошоків АС20 100/80 вихідного та отриманих після флотаційного розділення наведено в табл. 1.

**Таблиця 1 – Морфометричні характеристики порошоків АС20 100/80 вихідного та отриманих після флотаційного розділення**

Морфометричні характеристики	Вихідний порошок	Спосіб отримання продуктів				
		попередня хімічна обробка	флотаційне розділення без попередньої обробки		флотаційне розділення з попередньою обробкою	
	№ 1	№ 4	№ 2	№ 3	№ 6	№ 7
Максимальний діаметр Фере ( $F_{max}$ ), мкм	138,39	135,19	141,91	143,39	139,26	130,63
Мінімальний діаметр Фере ( $F_{min}$ ), мкм	105,64	103,55	107,16	108,40	106,82	98,08
Фере-подовження ( $F_{el}$ , аналог коефіцієнта форми)	1,3167	1,3125	1,3299	1,3285	1,3094	1,3453
Еліптичність, ( $E$ )	1,2778	1,2731	1,2929	1,2923	1,2709	1,3186
Шорсткість, $Rg$	1,0602	1,0601	1,0640	1,0621	1,0608	1,0623
Зовнішня питома поверхня, $F_{зпш}$ , $m^2/kg$	20,87	21,80	21,98	22,35	22,71	25,65
Кількість різальних кромок, ( $n$ ) шт	10	10	10	10	11	10
Середнє значення кута загострення різальних кромок, $\phi$ , град	106,37	106,32	104,22	104,54	106,61	103,67

З отриманих результатів випливає, що сортування порошку з застосуванням флотаційного розділення як з залученням попередньої хімічної обробки, так і без неї є перспективним способом отримання порошку покращеної якості за рахунок підвищення кількості зерен з однорідними морфометричними характеристиками. В той же час сортування не показало особливий вплив на середнє значення кількості різальних кромки. Це питання потребує подальших досліджень.

*Орел В.М., Саленко О.Ф., Скрипник В.С.,  
Савелов Д.В., Деревко А.І., Гаврушкевич Н.В.*  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗОВАНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ, ВИКОНАНИХ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ**

Власну історію лазерне селективне спікання (SLS/SLM) як адитивний виробничий процес розпочинає з кінця ХХ століття, коли дослідники науково обґрунтували доцільність виробництва деталей з порошків різних матеріалів та визначили основні засади, які дозволяли виробам мати інженерне застосування. Сутність цього процесу, як і більшості інших адитивних методів, полягає у поступовому пошаровому плавленні порошку (або його компонентів), внаслідок чого формується початкова структура, множина яких створює готовий виріб. Відтворення моделі йде покровоко, шар за шаром.

Процес SLS/SLM передбачає виконання ряду етапів – від підготовки даних САПР до видалення готової деталі з основи. За певних обставин також передбачається і постоброблення деталі: лезове, абразивне, термохімічне або фізико-технічне. Останнє ставить за мету формування мікро-, макро геометричних властивостей, забезпечення певного рівня залишкових напружень, структури поверхневого шару. Однак ключовий етап виробництва – це розплавлення тонкого шару порошку за допомогою лазера відповідно до алгоритмів, побудованих спеціальними програмними засобами, та подальше сплавлення окремих ділянок в єдину систему. Після завершення лазерного плавлення

поточного шару основа опускається, зверху на компонент деталі наноситься наступний шар порошку, і лазер плавить новий шар.

Існує кілька фізичних явищ, важливих як для реалізації процесу, так і з точки зору прогнозованості механічних характеристик та властивостей готового виробу, серед яких можна виділити такі:

- поглинаюча здатність порошкового матеріалу лазерного випромінювання;
- порожнистість, що порушує безперервність розплаву та формування структурних елементів;
- температурні коливання, які впливають на матеріал під час процесу, та інколи ведуть до утворення тріщин і навіть руйнування елементів виробу.

Вплив на ці явища потужності лазера  $E_l$ , швидкості сканування  $s_k$ , відстані між структурними елементами у площині викладання  $\Delta s$  та товщини шару  $\delta$  визначають кінцевий результат адитивного виробництва за технологією SLS/SLM.

Саме тому задача прогнозування і забезпечення властивостей виробів, виконаних SLS/SLM, є актуальною та значимою.

Зазвичай дана задача розв'язується шляхом застосування певних коригуючих впливів на основі аналізу залишкових напружень та порожнистості виготовленого виробу, зокрема,  $\xi, \%$ .

Однак складність опису спеченого матеріалу полягає у тому, що матеріал є неоднорідним, і при відносно малих товщинах володіє вираженою анізотропією властивостей, зокрема,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, E_x, E_y, E_z, G_x, G_y, G_z \dots$

Застосування математичної моделі структурно-неоднорідного середовища, яка базується на уявленні геометричної області  $V$  з границею  $\Gamma$ , що включає множину неперетинаючих областей  $w_i$ , обмежених поверхнями  $\Gamma_i$  та моделями середовищ, які, власне, займають ці області, дозволяє визначити властивості готового виробу на макромеханічному рівні. При цьому враховуються мікронеоднорідності спеченого середовища, які умовно можна обмежити наступними припущеннями:

Характерний розмір областей  $w_i$  набагато більший молекулярно-кінетичних розмірів.

Характерний розмір областей  $w_i$  набагато менший відстаней, на яких суттєво змінюються осереднені або макроскопічні параметри.

З цією метою введено поняття представницького обсягу. Представницьким обсягом області  $V_L$  спеченої структури з характерним розміром  $L$ , вважали субобласть  $V_l$  із характерним розміром  $l \ll L$  для непе-

первної у межах  $V_l$  функції  $g(r)$ , якщо існує осереднена за обсягом величина  $\bar{g} = \frac{1}{V_l} \int_{V_l} g(r) dr$ , та якщо для будь-якого позитивного нескінченно малого числа  $\delta_\gamma$  існує таке позитивне  $\gamma$ , що залежить тільки від

$$\delta_\gamma, \text{ що } \left| \frac{1}{V_l + \gamma l} \int_{V_l + \gamma l} g(r) dr - \frac{1}{V_l} \int_{V_l} g(r) dr \right| < \delta_\gamma.$$

Для того, щоб представницький обсяг  $V_l$  на фізичному рівні мав сенс елементарного макрообсягу мікронеоднорідного спеченого середовища, необхідно прийняти  $L \gg l \gg l_w$ , де  $l_w$  – характерний розмір компонента отриманого тіла. При виконанні зазначених умов можна нехтувати впливом масштабу осереднення  $l$  на значенні усередненої величини.

Тоді відтворене SLS/SLM середовище можна вважати мікромеханічно неоднорідним, якщо характерні розміри  $l_i$  його компонентів  $w_i$  значно більші за молекулярно-кінетичні розміри та значно менші за відстані, на яких істотно змінюються осереднені параметри стану. У даному випадку на мікрообсяги компонентів або фаз середовища, тобто на елементарні обсяги  $dV$ , що мають характерний розмір  $dl$ , причому  $dl \ll \Delta s$ ,  $\delta$ , поширюють властивості матеріалів компонентів або фаз, що утворюються при спіканні виробу, задовольняючи тим самим постулати механіки суцільного середовища.

З цих позицій, базуючись на уявленні матеріалу виробу як матеріалу з відносно регулярною структурою та уявляючи останній як середовище з ефективними фізико-механічними характеристиками, які є випадковими функціями координат, а також на припущенні, що елементарний обсяг композиту  $V$ , котрий включає достатньо велику кількість включень або порожнин, лінійний розмір яких значно менший за мінімальний лінійний розмір тривимірної області  $V$ , можна скористатися ймовірнісним підходом до визначення механічних властивостей готового виробу.

Так, для компонент модулів пружності у довільній точці створеного тіла з урахуванням випадкового прояву місць виникнення порожнин і сполучень тензор модулів пружності  $\lambda_{ij\alpha\beta}$  визначатиме тензорне випадкове поле.

Для такого тензорного випадкового поля  $\lambda_{ij\alpha\beta}(x_i^{(m)})$ , заданого в межах певної області  $v$ , кожній кінечній системі точок  $x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(n)}$  з цієї області має бути поставлений у відповідність  $N \cdot n$ -вимірний закон

розподілу ймовірностей величин  $\lambda_{ij\alpha\beta}$ , де  $N$  – кількість незалежних компонент тензора пружності.

Щільність розподілу ймовірності становитиме

$$f_1^n(\lambda_{ij\alpha\beta}) = f_1^n[\lambda_{ij\alpha\beta}(x_i^{(1)}), \dots, \lambda_{ij\alpha\beta}(x_i^{(n)})].$$

Тензорне поле модулів  $\lambda_{ij\alpha\beta}$  можна характеризувати, наприклад,  $n$ -точковим моментом порядку  $m$ :

$$\left\langle \underbrace{\lambda_{ij\alpha\beta}^{(1)} \dots \lambda_{pqrs}^{(1)}}_{m_1}, \underbrace{\lambda_{ij\alpha\beta}^{(2)} \dots \lambda_{pqrs}^{(2)}}_{m_2} \dots \underbrace{\lambda_{ij\alpha\beta}^{(n)} \dots \lambda_{pqrs}^{(n)}}_{m_n} \right\rangle =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int (\lambda_{ij\alpha\beta}^{(1)} \dots \lambda_{pqrs}^{(1)}) (\lambda_{ij\alpha\beta}^{(2)} \dots \lambda_{pqrs}^{(2)}) \dots (\lambda_{ij\alpha\beta}^{(n)} \dots \lambda_{pqrs}^{(n)}) f_1^n d\lambda^{(1)} \dots d\lambda^{(n)}$$

де  $m_n$  – число множників у точці  $x_i^{(n)}$ .

Такі  $n$ -точкові щільності розподілу та моменти є функціями  $3n$  координат (у 3-х вимірному просторі), що визначають положення точки  $x_i^{(n)}$ .

Для статично однорідного випадкового поля  $\lambda_{ij\alpha\beta}$ , тобто коли розподіл ймовірності не змінюється при перетворенні системи точок спостереження  $x_i = x_i + a$ ,  $a = const$ ,  $n$ -точкові щільності розподілу і моменти залежатимуть від  $3(n-1)$  координат. Тоді щільність розподілу статично неоднорідного поля випадкових величин залежить тільки від відносного розташування точок  $\{x^{(n)}\}$  у просторі, однак не залежить від положення у просторі груп точок. У цьому випадку одноточкові моменти приймаються постійними, а двоточкові визначаються різницею координат двох точок.

Напруженні  $\sigma_{ij}$  та деформації  $\varepsilon_{ij}$ , що виникають у тілі в момент плавлення конкретного шару також утворюють випадкові тензорні поля. Їх можна характеризувати щільностями розподілу:  $f_2^n(\sigma_{ij}) = f_2^n(\sigma_{ij}^{(1)}, \sigma_{ij}^{(2)} \dots \sigma_{ij}^{(n)})$ ,  $f_3^n = f_3^n(\varepsilon_{ij}^{(1)}, \varepsilon_{ij}^{(2)} \dots \varepsilon_{ij}^{(n)})$

Щільність розподілу напружень та деформацій відносно модулів пружності становить

$$\varphi^n(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij} / \lambda_{ij\alpha\beta}) = \varphi^n(\sigma_{ij}^{(1)}, \varepsilon_{ij}^{(1)} \dots \sigma_{ij}^{(n)}, \varepsilon_{ij}^{(n)} / \lambda_{ij\alpha\beta}^{(1)} \dots \lambda_{ij\alpha\beta}^{(n)}),$$

що дозволяє тензор макроскопічних модулів пружності  $\lambda_{ij\alpha\beta}^*$  мікронеоднорідного тіла описати рівнянням:  $\bar{\sigma}_{ij} = \lambda_{ij\alpha\beta}^* \bar{\varepsilon}_{\alpha\beta}$ , яке дозволило пов'язати середні за обсягом тіла напруження та деформації:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV; \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV.$$

Такі міркування дозволяють визначати рівень неоднорідності поля, і на основі статистичних оцінок (ймовірностей) визначати можливі зміни очікуваних механічних характеристик готового виробу на етапі його аналізу на предмет слайсингу (тобто поділу на площини для прототипування) а також при виборі раціональної траєкторії спікання.

Вирішення зазначеної задачі дозволить прогнозувати не тільки ймовірність пошкодження виробу, наприклад, тонкостінного баку, що приймає термобаричні навантаження, і а більш точно визначати механіку розвитку пошкоджень, що можуть привести до втрати функціональної та параметричної надійності виробу.

*Павлова Г.О.* ТОВ «Харківський машинобудівний завод «ФЕД», Харків, Україна

## **ДО ПРОБЛЕМИ РЕМОНТУ СПЕЦІАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

В сучасному світі проблема ресурсозбереження і питання її вирішення не тільки торкнулися, а й продовжують розгортатися у всіх сферах життя.

Переробка вторинної сировини стає все більш актуальною. «Сегрегація відходів», «стале споживання», «бережливе виробництво», «розумне споживання», «ощадливий дім», «енергоефективність» – ці та інші терміни стали невід’ємною частиною нашого сьогодення. Але, як не парадоксально, щоб реалізувати все це на практиці необхідні нові технології, відповідно нові підходи в виробництві, нові наукові досягнення. І все це потребує ресурсів, значних ресурсів. І це одне з протиріччя, з якими ми стикаємося в цій області.

Одним зі шляхів реалізації ідей ресурсозбереження є ремонт. Ремонт в тому чи іншому вигляді супроводжує нас в повсякденні, як на побутовому рівні так і глобальному. Але тут ми знову стикаємось з тим самим протиріччям: коли витрати на ремонт дорівнюють, а іноді і перевищують витрати на виготовлення нового виробу. І зараз мова більше іде про складні конструкції чи розбудови, наприклад, електростанції (гідро, вітряні тощо), повітряні чи морські судна (літаки, кораблі тощо), бурові платформи та інше. Не завжди є можливість розрахувати скільки

буде коштувати ремонт без демонтажу і верифікації частини конструкції чи обладнання. Ця проблема давно відома і багато авторів запропонували власний підхід до вирішення цієї проблеми, але універсальної відповіді так і не було знайдено. Тому кожного разу замовнику доводиться самому приймати рішення відносно ремонту. Крім того, в кожній сфері існують свої нюанси і тонкощі.

Особливо це стосується так званих відповідальних конструкцій. Де перевірка (верифікація всіх елементів) виробу, який необхідно відремонтувати, доволі складна, потребує витрат часу і грошей. Там де від роботи конструкції залежить безпека людини та навколишнього середовища, постають іще законодавчі норми. В авіаційній сфері, наприклад, організаційні процедури ремонту регламентуються авіаційним законодавством. В енергетиці подібна ситуація. Але все одно всього врахувати і передбачити фактично не можливо.

До того ж навіть використання сучасних технологій діагностування та контролю не завжди дає стовідсоткову впевненість в результаті (подальшої придатності елементу, його працездатності). І доводиться замінити якісь елементи на нові відходячи від принципів ресурсозбереження на даному етапі, аби зменшити рівень ризиків і заощадити в майбутньому – в глобальному сенсі.

Тому повертаючись до популярного тренду ресурсозбереження хотілося б, щоб завжди головним критерієм у прийнятті рішення щодо вибору підходу та шляху реалізації цього безумовно актуального питання, було відповідальне ставлення і виважене розуміння результату, з урахуванням всіх можливих ризиків, тобто дійсно «розумне споживання».

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

## **ПОВТОРНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ІНДУКЦІЙНЕ ТЕРМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ ЗОН ЗНЕМІЦНЕННЯ ЗВАРНИХ СТИКІВ РЕЙОК**

Для покращення структури металу в зварному шві і навколошовній зоні залізничних рейок після їх контактнo-стикoвого зварювання необхідно проводити їх індукційне термічне оброблення [1]. Особливо

це стосується рейок, вироблених із сучасних високовуглецевих рейкових сталей із різними системами легування.

Внаслідок високих температур та пластичної деформації зварне з'єднання залізничних рейок після контактної стикового зварювання має відмінну від основного металу структуру та налічує декілька певних зон, крайні з яких по обидва боки від лінії з'єднання – так звані зони знеміцнення, які примикають до основного металу рейки, не підданого термічному впливу зварювання. Ці зони мають знижену твердість і міцність.

Після проведення об'ємного термічного оброблення зварних стиків, при їх витримці при температурі вище точки фазового переходу  $A_{c3}$  ( $\sim 900 \dots 950$  °C) і прискореного охолодження, підвищується їх надійність, нормалізується метал, а його структура в зоні зварного стику знову наближається до структури основного металу рейки. Але зони неповної перекристалізації залишаються, змінюючи своє просторове положення відносно лінії з'єднання, зміщуючись далі від зварного шву і розширюючи свої границі, що пов'язано зі збільшенням протяжності зони індукційного нагрівання в порівнянні зі зварюванням. Нові зони знеміцнення утворюються по обидва боки від країв індуктора [2], що концентрично охоплює рейку, в повздовжньому напрямку рейки, утворюючи непряжні зони із зниженою твердістю, які також примикають до основного металу рейки. Це обумовлено перебуванням сталі в цих зонах під дією температур в районі  $700\text{--}350$  °C, достатнім за часом для його відпалу і утворення знеміцненого металу, у якому відбулася неповна його перекристалізація. При експлуатації рейки, у цих зонах можлива поява поверхневих деформацій у вигляді поперечних вм'ятин на поверхні кочення рейки від прокатування колесами.

Задля усунення цих зон і вирівнювання твердості по поверхні кочення рейки бажано проводити їх додаткове поверхнєве індукційне термічне оброблення з метою поверхневого загартування металу. Електричні і геометричні параметри індуктора, або пари індукторів і термічний цикл оброблення можуть різнитися від параметрів і циклу основного індуктора.

Виконання повторного поверхневого термічного оброблення зон знеміцнення бажано проводити на підвищеній частоті струму для зменшення проникнення індукованих струмів у глибину металу рейки. При цьому у глибинних шарах рейки метал не піддається інтенсивному тепловому впливу. Температурне поле під індуктором, яке поширюється по поверхні рейки сприяє подрібненню зерен металу, отриманню однорідної структури на зазначених ділянках рейки, а інтенсивне охолодження

після витримки температури, сприяє підвищенню твердості металу і зменшенню протяжності зон його знеміцнення на поверхні рейки. Поверхневе термічне оброблення може здійснюватись по усьому периметру рейки, або тільки її головки.

Оскільки об'єм металу зони знеміцнення, яка піддається поверхневому термічному обробленню менша ніж об'єм металу при об'ємному термічному обробленню зварного стику рейки, то потрібна відповідно і менша вкладена теплова потужність для його виконання, і ще менша при виконанні поверхневого термічного оброблення лише головки рейки.

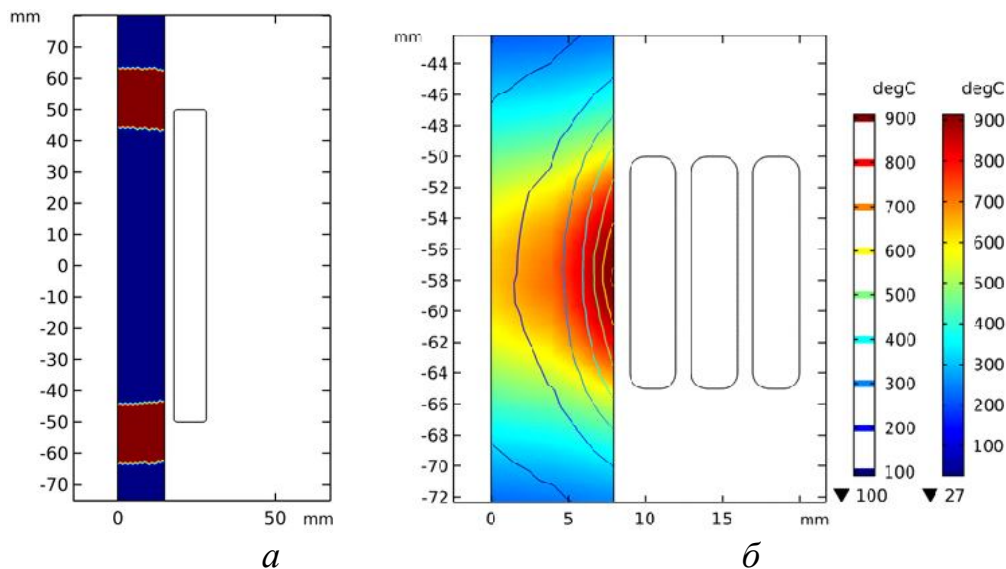
В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проводилися дослідні роботи з повторної поверхневої індукційної термічної обробки зон знеміцнення на модельних зразках [3] у вигляді сталевих стрижнів, які були вирізані із рейок з реальним зварним швом.

На рис. 1, а представлені розрахункові зони знеміцнення металу, які утворюються після виконання об'ємного термічного оброблення зони зварного стику суцільного сталевого стрижня діаметром 16 мм по обидва боки від торців широкого одновиткового індуктора який є джерелом електромагнітного поля. Розрахунки були виконані двовимірним математичним моделюванням розповсюдження температурного поля з урахуванням осьової симетрії елементів індукційної моделі в системі координат  $rOz$ . Після цього було виконано аналогічне математичне моделювання локального розповсюдження температурного поля при термічному обробленні зони знеміцнення вузьким індуктором з трьома коаксіальними витками, див. рис. 1, б.

Основною задачею моделювання був розрахунок індукційної системи та отримання температурного поля при обробленні зон знеміцнення повторним поверхневим нагріванням зразку, а також визначення основних електричних параметрів процесу нагрівання та часу його виконання. При розрахунку забезпечувалися умови концентрації тепла на поверхні зразку в межах зони знеміцнення із забезпеченням значного градієнта температур між поверхнею та віссю симетрії зразку без значного розтікання тепла в осьовому напрямку від зони нагрівання, щоб не утворювалися нові широкі зони знеміцнення. Це можливо при вкладенні значної питомої теплової потужності за малий проміжок часу в процесі нагрівання. Результати математичного моделювання представлені на рис. 1, б. Після нагрівання поверхню необхідно піддати швидкісному охолодженню.

За результатами математичного моделювання було виготовлено дослідні зразки у вигляді стрижнів діаметром 16 мм, які були вирізані із

реальних зварних стиків залізничних рейок типу Р65 із рейковою сталі К76Ф. Зварний шов розташований по центру зразків в повздовжньому напрямку. Виготовленими дослідними індукторами, аналогічними за розрахункові, зразки піддавалися спочатку об'ємному термічному обробленню широким одновитковим індуктором, яке імітує термічне оброблення зварного стику рейки, а потім і поверхневого термічного оброблення на підвищеній частоті струму вузьким трьохвитковим індуктором зону знеміцнення, з подальшим її швидкісним охолодженням.



**Рис. 1 – Розрахункові зони в сталевому стрижні: а – знеміцнення після його об'ємного термічного оброблення; б – при повторному поверхневому термічному обробленні зони знеміцнення**

Після повторного термічного оброблення зон знеміцнення поверхня зразків досліджувалась на твердість. Було встановлено, що термічне оброблення підвищує рівень твердості метала в цих зонах, наближаючи її до рівня твердості основного метала рейки.

Можна зробити висновок, що повторне поверхневе термічне оброблення зон знеміцнення рейкової сталі із швидким нагріванням і прискореним охолодженням струмами підвищеної частоти позитивно впливає на параметри метала, вирівнюючи рівень твердості зони термічного впливу, і цю додаткову операцію можна рекомендувати при проведенні термічного оброблення сталі.

## Література

1. Gubatyuk, R.S. Heat treatment of welded joints of high-strength railway rails (Review) / R.S. Gubatyuk // The Paton Welding J. – 2019. – №2. – P. 41–48.

2. Prokofiev, O.S. Development of inductors for bulk and surface heat treatment of welded butt joints of railway rails / O.S. Prokofiev, R.S. Gubatyuk, O.S. Pismennyi, S.V. Rymar, Ye.O. Panteleymonov // The Paton Welding J. – 2020. №5. – P. 41–48.

3. Hubatyuk, R.S. Simulation of electromagnetic and thermal fields in the process of induction heating on small specimens with the presence of welded joint of high-strength railway rails / R.S. Hubatyuk, S.V. Rymar, O.S. Prokofiev, V.A. Kostin, O.V. Didkovskiy, O.F. Muzhychenko // The Paton Welding J. – 2021. – №1. – P. 40–44.

*Рябченко С.В.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛІС КРУГАМИ З РУБІН-КОРУНДУ**

Підвищити якість обробки зубчастих коліс можливо шляхом застосування ефективних технологій зубошліфування. Технологія обробки полягає у використанні абразивних кругів із рубін-корунду при профільному шліфуванні зубчастих коліс. Шліфування кругами із рубін-корунду дозволяє підвищити точність обробки та знизити висотні параметри шорсткості зубчастих коліс і, тим самим, підвищити надійність та ресурс зубчастих передач.

Для процесу шліфування зубчастих коліс розроблені та виготовлені абразивні круги із рубін-корунду діаметром 400 мм, розроблені технологічні режими обробки, досліджена точність та шорсткість поверхонь зубчастих коліс після обробки. Випробування проводилися у промислових умовах на підприємстві АТ «Світло Шахтаря» (м. Харків). Шліфування зубчастих коліс виконувалось на зубошліфувальному верстаті з ЧПК мод. HÖFLER RAPID 1250. Оброблялись зубчасті колеса з такими параметрами: діаметр  $d_a = 345$  мм;  $z = 41$ ;  $m = 8$ ; ширина вінця  $B = 90$  мм (рис. 1).

Шліфування зубчастих коліс кругами із рубін-корунду дозволяє забезпечити якісні показники профілю зуба в порівнянні зі шліфуванням кругами із звичайними кругами з білого корунду. Забезпечуються висока точність профілю колеса, яка відповідає 2 ступеню точності (за DIN 3962). Шорсткість профілю зубчастого колеса дорівнює  $Ra 0,63$ , що відповідає вимогам креслення. Правку шліфувального круга із ру-

бін-корунду проводиться через 7–8 зубців (при використанні білого корунду – через 4–5 зубців), що забезпечує підвищену стійкість шліфувального круга із рубін-корунду.



**Рис. 1 – Установка шліфувального круга з рубін-корунду на верстат**

*Сахнюк І.О.* Технічний центр НАН України,  
Київ, Україна

## **ГАРМОНІЗАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯКОСТІ УКРАЇНИ З СИСТЕМОЮ ЄДИНОГО РИНКУ ЄС**

Рухаючись на шляху до подолання та розбудови економіки в післявоєнний період, Україна активно працює над збільшенням експорту, що стане основою для майбутнього економічного зростання. Маємо використовувати можливості для просування українських товарів та послуг за кордоном, розвитку експортних компетенцій, дослідження зовнішніх ринків та участі в міжнародних заходах. Про це йшлося на Міжнарод-

ному форумі «Інфраструктура якості України – платформа взаємодії бізнесу в системі єдиного ринку ЄС», що відбувся в травні 2024 року (<https://techreg.in.ua/міжнародний-форум-інфраструктура-як/#>).

Форум був організований за ініціативи Мінекономіки та за підтримки проекту TIPSTER Фонду підтримки реформ та програми міжнародної співпраці ReACT4UA («Застосування та імплементація Угоди про асоціацію між ЄС та Україною у сфері торгівлі»), яка фінансується урядом Німеччини і реалізується німецькою федеральною компанією Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Одним з інструментів гармонізації системи інфраструктури якості України з європейською стало виконання взятих Україною зобов'язань відповідно до Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, у тому числі в частині підготовки до укладення Угоди АСАА (Agreements on Conformity Assessment and Acceptance of Industrial Goods) – Угоди про оцінку відповідності та прийнятність промислової продукції.

Основна мета проведення Форуму: підвищити обізнаність бізнесу щодо системи інфраструктури якості України, сучасного стану правового регулювання сфери ринкового нагляду та захисту прав споживачів, переваг Угоди АСАА в контексті підвищення конкурентоспроможності малих і середніх підприємств, виходу вітчизняної продукції на європейський ринок та відновлення економіки України; надати платформу для малих і середніх підприємств для пошуку партнерів серед європейських виробників промислової продукції. Ключові завдання: почути пріоритети бізнесу та окреслити шляхи до створення єдиного європейського бізнес-середовища, де кожен з учасників матиме можливість налагодити комунікації з метою пошуку партнерів.

Захід відбувся в три сесії: I сесія: «Інфраструктура якості України: готовність до укладання Угоди АСАА та перспективи для бізнесу»; II сесія: «Регіональні центри інфраструктури якості для бізнесу: бліц-презентації»; III сесія: «Круглий стіл з бізнесом щодо практичних аспектів «промислового безвізу» у відносинах Україна-ЄС».

До участі у Форумі були запрошені представники: державних підприємств, установ, організацій, що провадять діяльність у сфері технічного регулювання, стандартизації, метрології та метрологічної діяльності; виробників та бізнесу, зацікавлених у виробництві та експорті промислової продукції України; інших заінтересованих сторін. Україна продовжує впевнено рухатися на шляху євроінтеграції та наближення до європейських цінностей, стандартів і правил. Однією зі складових

цього процесу є забезпечення належного та ефективного функціонування системи інфраструктури якості України, яка створена для того, щоб забезпечити безпеку та високу якість продукції та послуг. У рамках цієї системи фахівці та установи інфраструктури якості працюють разом для захисту здоров'я людей та навколишнього середовища. Це забезпечує якість та безпеку, що є важливим у багатьох сферах нашого життя — у виробничих процесах, на робочому місці та на ринку. Інфраструктура якості відіграє життєво важливу роль у бізнесі, інноваціях та торгівлі — як на національному, так і на міжнародному рівнях.

Одним з інструментів на шляху до відновлення економіки є укладення Угоди про оцінку відповідності та прийнятність промислової продукції — Угоди АСАА, яка є одним із різновидів угод про взаємне визнання результатів робіт з оцінки відповідності. Переваги укладення Угоди АСАА полягають у такому: вимоги українських технічних регламентів до продукції є ідентичними вимогам відповідних директив ЄС; стандарти для цілей застосування технічних регламентів та їх переліки є ідентичними відповідним європейським гармонізованим стандартам та їх перелікам; вимоги до призначених органів є ідентичними вимогам до нотифікованих органів в ЄС; українські виробники отримають право вводити в обіг на ринку ЄС продукцію, що пройшла оцінку відповідності в Україні; залучення інвестицій та посилення іміджу України на європейському та міжнародному рівнях.

Для українських та іноземних виробників усунення технічних бар'єрів у торгівлі в результаті укладення Угоди АСАА надасть можливість реалізовувати промислову продукцію на території як України, так і ЄС, на основі взаємного визнання результатів робіт з оцінки відповідності промислової продукції, визначеної Додатком III до Угоди про асоціацію. У результаті укладення АСАА українські виробники отримають нові бізнес-можливості в ЄС і за його межами, а споживачі — якісну та безпечну продукцію, вироблену за сучасними технологіями. Буде забезпечено створення нових стійких ланцюжків доданої вартості, зростання ВВП та наявність нових робочих місць. Це також стане важливою складовою економічної євроінтеграції.

Учасників Форуму було ознайомлено з основними досягненнями в рамках підготовки до укладення Угоди АСАА.

Проведення Форуму сприятиме популяризації інформації щодо наближення національної інфраструктури якості до європейських норм і правил та переваг Угоди АСАА, а участь у Форумі була доцільною нагодою для бізнесу підвищити обізнаність про: сучасний стан правового регулювання сфери ринкового нагляду та захисту прав

споживачів та діяльність технічних комітетів стандартизації; можливості торгівлі товарами без технічних бар'єрів у торгівлі та знайти платформу для пошуку надійних партнерів у тих сферах, де країнами накопичено суттєвий людський та виробничий потенціал.

*Соловійов В.Г., Романова І.Ю.* Інститут  
електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, Київ, Україна

## **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМОПІДВІДНОГО КРИСТАЛІЗАТОРА НА ФОРМУ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ ТА ПРОЦЕС НАПЛАВЛЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

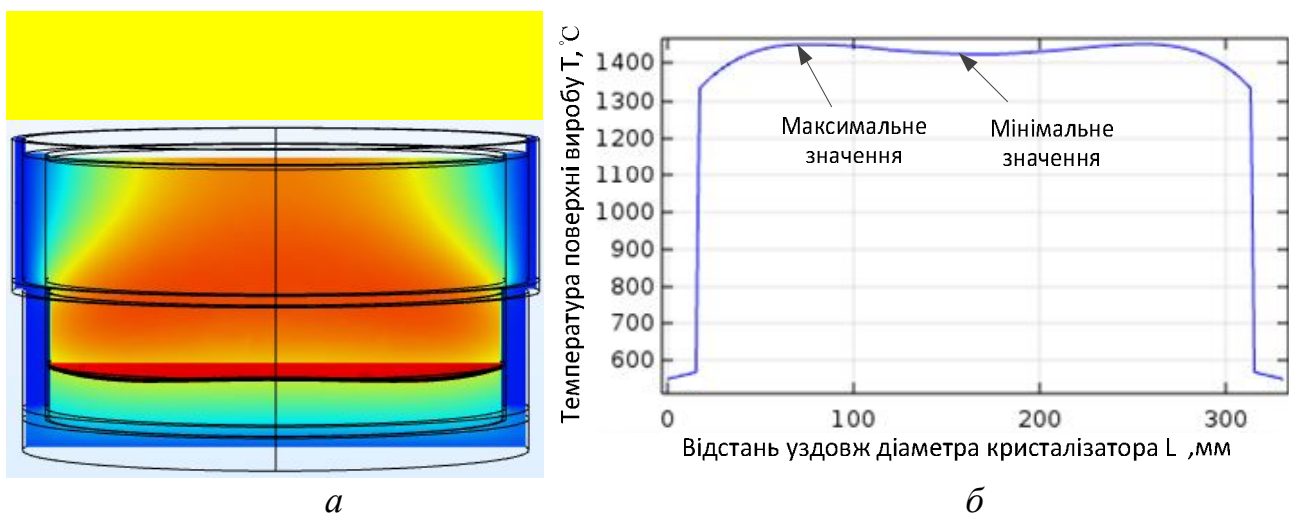
Полога рідка металева ванна (МВ) забезпечує більш рівномірне нагрівання металу та шлаку, що сприяє кращому рафінуванню та видаленню домішок, створює сприятливі умови для формування осьової або радіально-осьової кристалічної структури зливка, який має високу пластичність і однорідність. З метою виявлення факторів, що впливають на форму МВ, проведено математичне моделювання мультифізичних процесів джоулевого нагріву на скінченно-елементній моделі стаціонарного струмопідвідного кристалізатора (СПК). Проведено аналіз процесу отримання біметалевих виробів у СПК з круглим перерізом під час плавлення дискретної присадки при її порційному подаванні. За допомогою мультифізичного моделювання проведено розрахунки залежності таких параметрів форми МВ, як діаметр дзеркала та глибина рідкої фракції, від глибини шлакової ванни (ШВ) та від параметрів конструкції СПК: діаметра кристалізатора, товщин мідних втулок струмопідвідної та формуючої секцій кристалізатора, товщини водоохолоджуваного піддона, зміни висоти графітового облицювання в результаті зносу.

За результатами експериментальних даних побудовано залежність питомої електропровідності флюсу АНФ-29 від температури ШВ у точці її максимального значення. Отримано залежності потужності, що споживається кристалізатором, від електропровідності ШВ для чотирьох ступенів роботи джерела живлення ТШП-10.

Результати моделювання показали, що збільшення глибини ШВ (при незмінних інших геометричних параметрах) призводить до збі-

льшення глибини МВ. Виявлено значний вплив зносу нижнього краю графітової футеровки на параметри МВ. При збільшенні зносу зменшуються глибина та діаметр МВ, падає електропровідність і споживана потужність ШВ. Заміна мідної втулки струмопідвідної секції кристалізатора (СПСК) на сталеву при збереженні напруги на СПСК практично не впливає на величину споживаної потужності та електропровідності, але призводить до збільшення глибини та діаметра МВ. При незмінній напрузі на СПСК практично відсутній вплив зміни товщини стінки мідної втулки СПСК і формуючої секції кристалізатора на його електропровідність і споживану ним потужність. Також на це практично не впливає зміна товщини піддона. Але збільшення товщини піддона призводить до збільшення глибини та діаметра дзеркала МВ.

При збільшенні діаметра кристалізатора від 180 до 300 мм споживана ним потужність, електропровідність і діаметр дзеркала МВ збільшуються практично пропорційно діаметру кристалізатора. Глибина МВ при цьому зменшується майже вдвічі. З рис. 1, б видно нерівномірність розподілу температури при МВ у формі «сомбреро», показано мінімальні та максимальні значення температури.



**Рис. 1 – Форма МВ і температура вздовж діаметра верхньої кромки виробу при діаметрі кристалізатора 260 мм: а – МВ у формі «сомбреро»; б – розподіл температури**

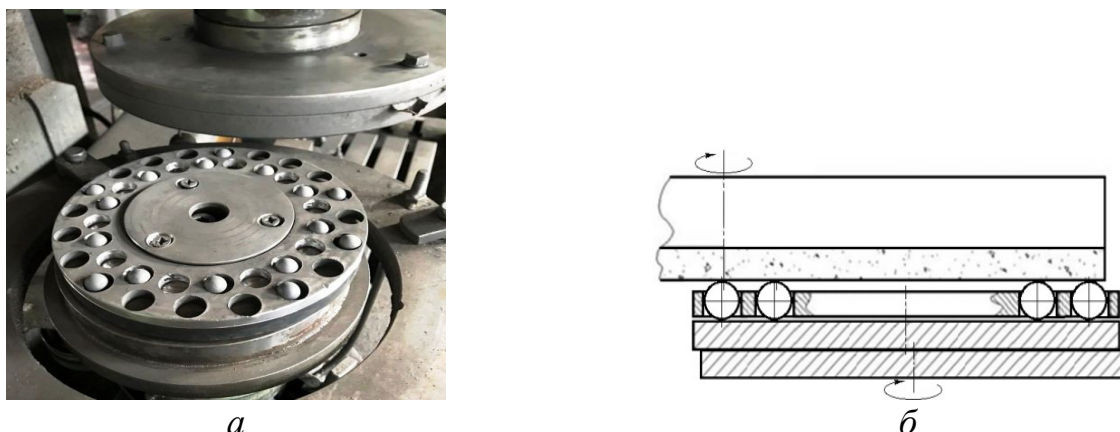
Результати досліджень можуть бути застосовані при вдосконаленні конструкції кристалізатора та технології процесу плавлення дискретної присадки при порційному подаванні в СПК, що зробить металеву ванну більш пологою.

## **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ НА ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО КРУГА**

Представлено результати експериментального дослідження впливу геометричних параметрів схеми алмазно-абразивного шліфування керамічних куль із карбіду кремнію з базуванням на площині й їхньою подачею за епіциклоїдою. Показниками зношування поверхні алмазно-абразивного круга прийнято кут нахилу робочої поверхні у радіальному напрямку і швидкість змінювання цього кута.

Технологія алмазно-абразивного шліфування прецизійних куль із керамічних матеріалів не є новою, але постійне удосконалення власне керамічних композиційних матеріалів потребує неодмінного удосконалення і модернізації їхньої алмазно-абразивної обробки. Ключовим ланцюгом у цьому є алмазно-абразивний інструмент. Від його розмірної стійкості залежить не тільки отримання високої точності формоутворення сферичної поверхні виробу, а і загалом досягнення високої продуктивності технологічного процесу шліфування. Як показали раніше проведені нами експериментальні дослідження при застосуванні існуючих технологічних схем [1, 2], недоліком останніх є виникнення нерівномірності зношування робочої поверхні круга, особливо поблизу осі його обертання або краю круга, що негативно відображається на точності форми куль. Це пов'язано насамперед з незмінністю траєкторії кругової подачі куль, а також схемою розташування останніх в сепараторі. Тому подальше удосконалення технологічних схем полягає на наш погляд у введенні руху подачі заготовок за епіциклоїдою, що досягається зміщенням осі обертання сепаратора з кулями на певний ексцентриситет відносно осі обертання столу пристрою (рис.1). Така схема обробки сприяє додатковому руху заготовки уздовж стінок отворів обертового сепаратору під дією відцентрових сил з намаганням заготовок зайняти положення з мінімумом роботи цих сил, що сприяє зменшенню несферичності оброблювальних заготовок. Наразі не досліджено закономірності впливу зазначеної технологічної схеми шліфування, як варіювання геометричними параметрами цієї схеми (як-от перекриття осі обертання круга окружностями, розташування отворів сепаратора для розміщення куль —

зовнішньою або внутрішньою, співвідношення кількості кульок на цих окружностях, розташування поля траєкторій подачі кульок відносно осі обертання круга) на характер зношування круга.



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

Таким чином метою даного експериментального дослідження процесу алмазно-абразивного шліфування керамічних кульок з їхнім базуванням на площині і рухом подачі за епіциклоїдою було встановлення закономірностей зношування алмазно-абразивного круга залежно від геометричних параметрів такої схеми процесу за незмінного режиму обробки, ефективність якого доведена нами в [1, 2].

Алмазне шліфування заготовок керамічних куль з нітриду кремнію проводили на технологічному стенді на базі верстата мод. 6Т12-1 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для базування на площині вільно обертових у отворах також вільно обертового сепаратора заготовок керамічних куль. Отвори сепаратора виконано по зовнішньому і внутрішньому колу навколо осі його обертання, а здійснення руху подачі заготовок за епіциклоїдою забезпечував ексцентриситет осі обертання сепаратора (див. рис. 1). У досліджах ексцентриситет осі обертання сепаратора складав 3 мм, досліджувані траєкторії подачі куль забезпечувало розташування отворів у сепараторі на окружностях діаметром у 147 і 119 мм. Через такі геометричні співвідношення перекриття осі обертання круга полем траєкторії подачі куль здійснювалося або зовнішньою окружністю отворів, або внутрішньою окружністю отворів під час зміщення пристрою від зазначеного положення до центру на 14 мм. Симетричне або несиметричне розташування поля траєкторій відносно осі обертання круга забезпечувало зміщення пристрою від обох зазначених положень на 3 мм.

Алмазний шліфувальний круг форми 6A2T 300×3 (з розташуванням суцільного алмазного шару на торці круга) містив алмази марки AC32 зернистістю 200/160 і концентрацією 100% на металевій зв'язці M2-01. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних куль складала 16 шт. Незмінний режим шліфування заготовок кульок було обмежено швидкістю шліфування у 29,5 м/с ( $n_k = 1600$  об/хв) і швидкістю обертання столу пристрою у 2,2 м/с ( $n_z = 275$  об/хв) за дискретної подачі круга на врізання у  $10^{-5}$  м кожні 5 хв (0,01 мм/5 хв). Час проведення кожного дослідів – 30 хв.

Показниками зношування алмазно-абразивного круга були кут нахилу  $\lambda$  робочої поверхні у радіальному напрямку, а також швидкість змінювання  $v_\lambda$  кутів нахилу профілю круга у радіальному напрямку до й після проведення чергового дослідів. Для їхнього обчислення вимірювали усереднену координату  $y_m$  профілю поверхні круга у радіальному напрямку та як результат апроксимації вказаної сукупності точок визначали рівняння лінійного та кубічного трендів  $y_r = f(r)$  залежно від радіусу поверхні круга, перше з яких слугувало базою для обчислення  $\lambda$  і  $v_\lambda$ .

Вимірювання координати  $y_i$  профілю поверхні круга проводили безпосередньо на стенді за допомогою індикатора часового типу ПЧ-10 з ціною поділки шкали 0,01 мм і збільшеною довжиною вимірювань, закріпленого на штативі, як описано в [1]. Показник  $y_m$  обчислювали після безпосереднього вимірювання координати  $y_i$  робочої поверхні круга у реперних точках у трьох радіальних напрямках й наступного усереднення. Тридцять реперних точок у кожному радіальному напрямку були рівновіддаленими одна від одної, перша з них знаходилася на осі обертання круга, а остання – за 5 мм від зовнішнього краю алмазного шару. Перший радіальний напрямок вибирали довільно і вже не змінювали його по ходу виконання кожного дослідів. Вимірювання повторювали для інших двох радіальних напрямків, рівновіддалених від першого напрямку і один від одного. Вимірювання виконували до проведення дослідів і після кожного дослідів. Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [3], під час обчислення середніх значень координати  $y_m$  їх перевіряли на наявність результатів, що різко виділяються серед інших – дисперсії вибірок перевіряли на однорідність за  $G$ -критерієм Кохрена. Середню стандартну похибку вимірювання координати  $y_m$  обчислювали як середнє арифметичне похибок вимірювання  $y_m$  початкового профілю круга й після кожного з восьми дослідів, які у свою чергу були

середнім значенням стандартних похибок вимірювання координати  $y_i$  у реперних точках. Середня стандартна похибка вимірювання  $y_{mi}$  склала 45,5 мкм.

За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу  $2^3$  визначали коефіцієнти впливу: перекриття  $c_T$  осі обертання круга траєкторіями подачі кульок – зовнішньою або внутрішньою, співвідношення  $q_k$  кількості куль на зовнішній і внутрішній траєкторіях, розташування поля траєкторій  $e_T$  відносно осі обертання алмазного круга – симетричного або несиметричного [4]. План повного факторного експерименту передбачав варіювання трьома факторами на наступних двох рівнях: перекриття  $c_T$  осі обертання круга – зовнішньою (-1) або внутрішньою (+1) окружностями розташування отворів у сепараторі, співвідношення  $q_k$  кількості кульок у отворах на зовнішній і внутрішній окружностях – 6/10 й 10/6, розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга – симетричне ( $e_T = 0$  мм) й несиметричне ( $e_T = 3$  мм).

В результаті дослідження зношування алмазного круга залежно від геометричних показників схеми шліфування керамічних кульок отримано закономірності змінювання профілю робочої поверхні круга як у вигляді сукупності експериментальних точок  $y_{mi}$  для реперних значень радіуса  $r$ , так і у вигляді ліній тренду утворюваної профілю круга, представлених функцією кубічної регресії (рис. 2).

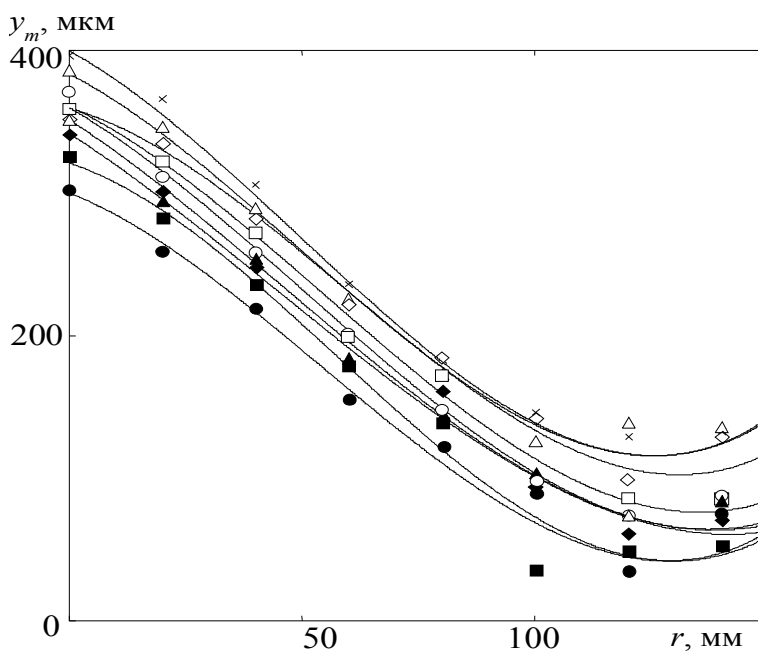


Рис. 2 – Визначені експериментально координати початкового ( $\times$ ) профілю круга й після проведення дослідів 1 ( $\Delta$ ), 2 ( $\diamond$ ), 3 ( $\square$ ), 4 ( $\circ$ ), 5 ( $\blacktriangle$ ), 6 ( $\blacklozenge$ ), 7 ( $\blacksquare$ ), 8 ( $\bullet$ ), , а також апроксимовані поліномами 3-го ступеня лінії тренду

Усереднені значення розрахованих значень кута нахилу  $\lambda$ , швидкості змінювання  $v_\lambda$  кута  $\lambda$  у дослідях представлено в табл. 1, де застосовано позначення опису експериментальних умов малими буквами як найбільш компактно, оскільки за такої умови відсутність відповідної літери вказує на нижній рівень фактору, а її наявність — на верхній рівень [4, 5].

**Таблиця 1 – Показники зношування круга**

Позначення дослідів	Показники зносу круга	
	$\lambda$ , рад	$v_\lambda$ , с <sup>-1</sup>
(1)	-1,1170	$1,89 \cdot 10^{-5}$
<i>a</i>	-1,1022	$3,74 \cdot 10^{-6}$
<i>b</i>	-1,1460	$-1,99 \cdot 10^{-5}$
<i>ab</i>	-1,1536	$-4,31 \cdot 10^{-6}$
<i>c</i>	-1,1310	$1,27 \cdot 10^{-5}$
<i>ac</i>	-1,1294	$8,42 \cdot 10^{-7}$
<i>bc</i>	-1,1458	$-9,09 \cdot 10^{-6}$
<i>abc</i>	-1,1019	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Результати розрахунків в цьому дослідженні свідчать, що максимального наближення  $\lambda$  до нульового значення в межах дослідженого діапазону параметрів слід очікувати за умови співвідношення  $q_k$  на рівні 0,6 й симетричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ( $e_T = 0$  мм).

Спираючись на отриману модель швидкості  $v_\lambda$ , можна стверджувати, що залежно від мети: досягнення максимальної швидкості  $v_\lambda$  чи стабілізація кута нахилу в певному стані зносу круга, маємо наступне: у першому випадку умовою є співвідношення  $q_k$  на рівні 0,6 й несиметричне розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ( $e_T = 3$  мм); у другому – значення  $v_\lambda$  поблизу нуля слід очікувати за умови вибору співвідношення  $q_k$  на рівні 0,8, а  $e_T = 2,4$  мм.

Таким чином сприятливим для підвищення точності форми кульок слід вважати перекриття  $c_T$  осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі, співвідношення  $q_k$  кількості куль на окружностях розташування отворів на рівні 0,6, а  $e_T = 3$  мм за режиму обробки: швидкість шліфування у 29,5 м/с ( $n_k = 1600$  об/хв) і швидкість обертання столу технологічного пристрою у 2,2 м/с ( $n_3 = 275$  об/хв) за дискретної подачі круга на врізання у  $10^{-5}$  м кожні 5 хв (0,01 мм/5 хв).

Виходячи з викладеного вище можна стверджувати, що в результаті виконаного нами експериментального дослідження процесу алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з їхнім базуванням на площині й руху подачі заготовок куль за епіциклоїдою встановлено закономірності зношування круга в залежності від геометричних параметрів розглянутої схеми процесу. Показано, що означений вплив геометричних параметрів схеми шліфування на зношування алмазно-абразивного круга адекватно описуються лінійними залежностями обраних показників процесу з певним впливом нелінійності за рахунок ефектів взаємодії від співвідношення кількості кульок на окружностях розташування отворів у сепараторі пристрою й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга за незмінного перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі.

Сприятливим для підвищення точності форми кульок слід вважати перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі, співвідношення кількості куль на окружностях розташування отворів на рівні 0,6 й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ( $e_r = 3$  мм) за незмінного режиму обробки: швидкість шліфування 29,5 м/с, швидкість обертання столу технологічного пристрою 2,2 м/с і дискретна подача круга на врізання –  $10^{-5}$  м кожні 5 хв.

### Література

1. Sokhan', S.V. Diamond Grinding of Ceramic Balls with a Circular Feed / S.V. Sokhan', V.V. Voznyi, V.G. Sorochenko, M.P. Hamaniuk // J. Superhard Mat. – 2023. – Vol. 45, №4. – P. 293–305.
2. Sokhan', S.V. Diamond Grinding of Ceramic Balls in an Annular Groove / S.V. Sokhan', V.V. Voznyi, V.G. Sorochenko, M.P. Hamaniuk // J. Superhard Mat. – 2024. – Vol. 46, №... – P. ...
3. Кононюк, А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента) / А.Е. Кононюк. – К. : Изд-во КНТ, 2011. – Т. 2. – 453 с.
4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. . Новикова; Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. К. : НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля, 2007. – 340 с.
5. Sokhan', S.V. Wear of a Diamond Wheel during Grinding of Ceramic Balls Made of Silicon Carbide / S.V. Sokhan', V.V. Voznyi, A.V. Redkin, V.G. Sorochenko, M.P. Hamaniuk, E.M. Zubaniev // J. Superhard Mat. – 2020. – Vol. 42, №6. – P. 432–442.

## **НАПРАВЛЕНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БАБИТОВИХ ПОКРИТТІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ НАСОСІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

Постійна нестача енергії в Україні, незважаючи на розвиток ядерної енергетики потребує створення нового та надійного енергетичного устаткування, зокрема насосів різного призначення. Вже кілька років насосне обладнання АЕС, завдяки особливостям умов роботи, специфічним вимогам до насосів різних технологічних систем АЕС, і головне, виключно високим вимогам до їх надійності, виділяють у самостійну галузь загального насособудування.

Більшість відповідальних деталей та вузлів насосних агрегатів працюють при високих режимних параметрах (швидкостях, навантаженнях і температурах), а також в умовах корозійного, абразивного, радіаційного та інших видів впливу робочих середовищ. Вирішення проблеми, пов'язаної зі збільшенням термінів служби машин та механізмів, безпосередньо залежить від зносостійкості та надійності вузлів тертя. Насосні агрегати, задіяні на енергетичних підприємствах АЕС, постійно вдосконалюються, що надає необхідність створення більш надійних і довговічних їх деталей і вузлів.

При великому розмаїтті умов роботи деталей найбільш навантаженими в них є поверхневий шар з якого, як правило, і починається їх руйнування. Тому реальний ресурс роботи обладнання залежить від несучої здатності поверхонь деталей, яка визначається якістю їх поверхневого шару, від якої і залежить стійкість до зношування.

З кожним роком як в Україні, так і в країнах ближнього та дальнього зарубіжжя, вчені займаються створенням нових ефективних технологій підвищення якості поверхневого шару деталі. Серед великого різноманіття цих технологій немалий відсоток займають технологічні процеси створіння композиційних матеріалів типу «основа – покриття», що поєднують захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи. Таким чином, створення поверхневих шарів з особливими властивостями для вузлів тертя ковзання, в даному випадку підшипників ковзання (ПК) є актуальним завданням.

Вихід із ладу ПК при нормальних умовах експлуатації є наслідком різних видів зношування: кавітації, абразивного зносу, пошкодження внаслідок пластичних деформацій, втомлювальне пошкодження та ін.

Стійкість до зносу антифрикційного шару залежить від режиму роботи та конструкції ПК, фізичних властивостей з'єднання бабітового шару з основою, жорсткості валу та постелі під вкладиші підшипника [1].

Більшість способів формування поверхонь бабітових ПК слід розглядати як альтернативні. Один і той самий матеріал покриття може бути нанесений декількома способами. При цьому можуть відрізнятися як властивості покриття, так і витрати на його нанесення. Зазвичай бабіти заливають на підігріті вкладиші (250 °С) за температури 450–480 °С. Найчастіше застосовують відцентрове заливання. Заливають також у кокіль під тиском, товщина заливки в підшипниках 1–3 мм<sup>2</sup>.

Останніми роками для виготовлення та ремонту ПК набули поширення декілька нових методів: газотермічне напилення, гальванічне нарощування, штампування в температурному інтервалі кристалізації, надзвукове напилення ДИМЕТ [2].

Встановлено, що при виготовленні ПК, формування методом електроіскрового легування (ЕІЛ) проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, зі сталеву підкладкою, а з іншого – з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) і бабіту, забезпечує більш міцне (на 35%) зчеплення, в порівнянні з традиційною технологією (сталь 20 + бабіт), сталеву підкладки з бабітом, а також інтенсивніше відведення тепла із зони тертя. Визначено, що резервом підвищення якості формування бабітових покриттів, що значною мірою впливає на довговічність ПК, може бути нова технологія в якій всі операції здійснюють методом ЕІЛ. Встановлено, що для визначення більш раціональної технології нанесення бабітових покриттів необхідно розробити фізично обґрунтовану математичну модель, що пов'язує знос певної кількості бабіту з витраченою на це роботою тертя.

Нами розроблено систему спрямованого вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття на вкладиші ПК, яка враховує як економічні, так і екологічні вимоги. На підставі проведених досліджень запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу бабітових покриттів (рівняння зносу), яка дозволяє вирішувати як пряму задачу – визначати ваговий та лінійний знос за відомою роботою тертя, так і зворотною – знаходити необхідну роботу тертя для отримання потрібної величини вагового, або лінійного зносу. Знаючи час досягнення певної величини зносу, з'являється можливість більш раціональної експлуатації виробів, своєчасно призначаючи час ремонту і не допускаючи до катастрофічного зносу поверхні тертя.

В процесі виконання досліджень розроблено методику визначення констант рівняння зносу: енергії активації ( $E_A$ ), а також максимально-го вагового, та лінійного зносу, які можуть бути використані, як критерії вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

### **Література**

1. Тарельник, Н.В. Спосіб складання підшипників ковзання: Пат. на корисну модель №150743. Україна. МПК В23Н 5/00 / Н.В. Тарельник. – Опубл. 06.04. 2022, Бюл. №2.

2. Гапонова, О.П. Новий спосіб складання підшипників ковзання відцентрових насосів, які працюють в умовах радіаційного опромінювання / О.П. Гапонова, В.С. Марцинковський, Н.В. Тарельник, В.М. Зубко, М.Ю. Думанчук // Наук. вісник Івано-Франківського нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2022. – №73. – С. 7–15.

*Тимофеева Л.А., Сергеев О.В., Волошина Л.В.*  
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## **КАЛІБРУВАННЯ СУБМІКРОННОГО МІКРОМЕТРА У МЕТРОЛОГІЧНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ: ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ВІДТВОРЮВАНOSTІ**

Калібрування субмікронних мікрометрів є важливим етапом у забезпеченні точності вимірювань у промисловості та наукових дослідженнях. Метрологічні лабораторії відіграють ключову роль у цьому процесі, забезпечуючи відповідність приладів вимогам стандартів та нормативних документів. У цій роботі розглянемо основні калібрувальні міри, стандарти, вимоги та процес калібрування субмікронного мікрометра, а також запропонуємо методи покращення точності та відтворюваності вимірювань.

Субмікронний мікрометр – це вимірювальний прилад, призначений для вимірювання з високою точністю, часто до нанометрів (1 нм = 0,001 мкм). Калібрування субмікронних мікрометрів здійснюється з використанням високоточних калібрувальних мір, які є еталонами для визначення точності вимірювань.

Основними стандартами, які регулюють процес калібрування, є ISO 17025, що встановлює вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій, ISO 10360, який визначає технічні вимоги до координатних вимірювальних машин, та ISO 3650, що регламентує вимоги до калібрувальних блоків. Ці стандарти забезпечують точність та відтворюваність вимірювань, що є критично важливими для метрологічної практики.

Процес калібрування субмікронних мікрометрів повинен відповідати високим вимогам щодо точності, стабільності та відтворюваності результатів. Точність означає мінімальну похибку вимірювань, стабільність – збереження точності показань приладу протягом тривалого часу, а відтворюваність – отримання однакових результатів при повторних вимірюваннях у тих самих умовах.

Калібрування проводиться в контрольованих умовах, зокрема при температурі  $20 \pm 0,5$  °C та відносній вологості 40-60%. Важливим аспектом є чистота лабораторії, оскільки забруднення можуть негативно вплинути на точність вимірювань.

Процес калібрування субмікронного мікрометра починається з підготовчого етапу, який включає огляд приладу на наявність механічних пошкоджень та його очистку від пилу та забруднень. Після цього здійснюються вимірювання з використанням калібрувальних блоків з відомими розмірами, що дозволяє встановити еталонні значення.

Вимірювання проводяться шляхом порівняння показів мікрометра з еталонними значеннями. Різниця між виміряними та еталонними значеннями визначає похибку приладу. Для точності та відтворюваності вимірювань важливо використовувати високоточні калібрувальні міри та дотримуватися всіх вимог до умов калібрування.

Мікрогвинт є ключовим елементом у конструкції мікрометра, що визначає точність його показань. Для забезпечення високої точності субмікронного мікрометра важливо враховувати кількість обертів мікрогвинта. Зазвичай, один повний оберт мікрогвинта відповідає переміщенню вимірювального стрижня на 0,5 мм. Для досягнення субмікронної точності необхідно використовувати мікрометри з точною шкалою, де один оберт мікрогвинта може бути поділений на 100 або більше поділок, забезпечуючи точність вимірювань до 0,01 мкм або 10 нм.

Розглянемо як приклад мікрометр МІКРОТЕХ – сучасний прилад, що забезпечує високу точність вимірювань завдяки своїй конструкції та використанню інноваційних технологій. Мікрометри МІКРОТЕХ оснащені високоточними мікрогвинтами, що дозволяють

здійснювати вимірювання з точністю до 0.001 мкм. Крім того, вони мають цифровий дисплей, який спрощує зчитування результатів та зменшує можливість людської помилки.

При калібруванні мікрометрів використовуються такі основні формули:

1. Формула обчислення похибки вимірювання:

$$\Delta = V_m - V_e, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – похибка вимірювання;  $V_m$  – виміряне значення;  $V_e$  – еталонне значення.

2. Формула середньої похибки:

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}, \quad (2)$$

де  $\Delta_{cp}$  – середня похибка;  $n$  – кількість вимірювань;  $\Delta_i$  – похибка окремого вимірювання.

3. Формула для обчислення варіації:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(V_{mi} - V_m^-)^2}{n-1}, \quad (3)$$

де  $S^2$  – дисперсія;  $V_{mi}$  – окреме виміряне значення;  $V_m^-$  – середнє значення вимірювань;  $n$  – кількість вимірювань.

Для покращення точності та відтворюваності вимірювань субмікронних мікрометрів можна застосовувати кілька підходів. Перш за все, впровадження автоматизованих систем калібрування значно зменшує вплив людського фактора на результати вимірювань. Такі системи можуть проводити калібрування в автоматичному режимі, забезпечуючи високу точність та стабільність результатів.

Використання сучасних матеріалів для виготовлення калібрувальних блоків також є важливим аспектом. Матеріали з мінімальними температурними коефіцієнтами розширення забезпечують стабільність розмірів блоків при зміні температури, що підвищує точність калібрування.

Оптимізація умов калібрування, зокрема підвищення стабільності температури та зменшення впливу вологи, дозволяє досягти більш точних результатів. Сучасні системи клімат-контролю та осушувачі повітря допомагають підтримувати оптимальні умови в лабораторії, що позитивно впливає на точність вимірювань.

Застосування антивібраційних столів та вакуумних камер для калібрування приладів допомагає мінімізувати вплив механічних впли-

вів та повітряних потоків на результати вимірювань. Такі підходи забезпечують високу точність та стабільність результатів, що є критично важливим для метрологічної практики.

Після завершення процесу калібрування результати повинні бути задокументовані відповідно до встановлених стандартів. Документування результатів включає оформлення сертифікату калібрування, який підтверджує точність та відповідність мікрометра вимогам стандартів. Сертифікат калібрування є важливим документом, що засвідчує точність вимірювального приладу та його відповідність вимогам метрологічних стандартів.

Калібрування субмікронних мікрометрів є складним та важливим процесом, що забезпечує точність вимірювань у різних галузях.

### **Література**

1. Закон України № 1314-VII від 5 червня 2014 року «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. <https://www.vitalsource.com/products/the-fourth-industrial-revolution-klaus-schwab-v9781524758875>
3. Бромберг, Э.М. Тестовые методы повышения точности измерений / Э.М. Бромберг, К.Л. Куликовский. – М. : Энергия, 1978. –176 с.
4. Shi, D. An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements / D. Shi, D. J. Tylavsky, N. Logic // IEEE Transact. on Smart Grid. – 2012. – 3(4). – P. 1575–1583.

*Тимофєєв С.С., Роценко О.В., Рукавішников П.В.,  
Козловська І.П. Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків, Україна*

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ СУЧАСНИМИ КОМП'ЮТЕРНИМИ ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ**

На сьогоднішній день постає питання підвищення точності вимірів при калібруванні, експлуатації та ремонті вимірювальних інструментів. Так як сучасне виробництво прагне до виготовлення більш якісної, конкурентноспроможної продукції в умовах сучасної конкуренції зі зменшенням витрат власних ресурсів. Тому сучасне вироб-

ництво потребує максимально точного, надійного та якісного вимірювального інструменту. Отже питання підвищення точності, а також повторюваності і стабільності отриманих результатів вимірювань є актуальним.

В процесі калібрування та використання вимірювальних інструментів з'являється вплив на достовірність отриманих результатів, таких чинників як: температурні умови, вологість, стан інструментів, точність калібрування, технологічні впливи, людський фактор, методи вимірювань, навколишнє середовище.

Фактор температурних змін є одним із основних факторів, що впливають на точність вимірювань, оскільки різні матеріали мають різні коефіцієнти температурного розширення (КТР). Це може призводити до значних похибок у вимірюваннях. Тому розробка методів компенсації температурних впливів за допомогою сучасних комп'ютерних вимірювальних інструментів є надзвичайно важливою для забезпечення високої точності вимірювань.

Майбутнє метрології пов'язане з розвитком інтелектуальних та мережевих технологій, які дозволяють враховувати та компенсувати температурні впливи під час вимірювань. Одним з перспективних напрямків компенсації температурних впливів є створення комп'ютерних вимірювальних інструментів, які можуть мати велику кількість можливостей та функціонал, що забезпечують високу точність вимірів та швидкість аналізу, обробки і передачі інформації. Основною перевагою комп'ютерних вимірювальних інструментів є можливість адаптації до індустрії 4.0. [1–3]

Основні методи компенсації температурних впливів:

1) Використання матеріалів з низьким коефіцієнтом температурного розширення (КТР). Інвар: Використання матеріалів, таких як інвар, які мають дуже низький КТР, допомагає мінімізувати температурні деформації вимірювальних інструментів і деталей. Це особливо важливо при виготовленні високоточних деталей.

2) Температурне стабілізування:

- Кліматичні камери: Проведення вимірювань у спеціальних кліматичних камерах з контрольованою температурою дозволяє уникнути впливу зовнішніх температурних коливань і забезпечити стабільні умови для вимірювань.
- Стабілізація температури інструменту і деталі: Інструмент та деталь перед вимірюванням стабілізуються при однаковій температурі протягом певного часу, що знижує температурні впливи.

### 3) Математична компенсація:

- Корекція результатів вимірювань: Використання формул для корекції вимірюваних величин з урахуванням температурних змін. Це враховує КТР матеріалу деталі та інструменту і дозволяє компенсувати температурні коливання.
- Алгоритми компенсації: Використання спеціального програмного забезпечення для автоматичної корекції вимірювань з урахуванням температурних змін.

### 4) Вбудовані температурні датчики:

- Інтегровані датчики температури: Використання вимірювальних приладів з вбудованими датчиками температури дозволяє автоматично коригувати результати вимірювань у режимі реального часу.
- Багатоточкові вимірювання: Вимірювання температури у кількох точках деталі та використання середнього значення для корекції.

### 5) Системи зворотного зв'язку.

Активні системи контролю температури: Використання активних систем, що забезпечують стабільну температуру робочого середовища та вимірювальних інструментів, наприклад, шляхом нагрівання або охолодження.

### 6) Пасивні методи:

- Теплоізоляція: Використання ізоляційних матеріалів для зменшення впливу зовнішніх температурних коливань на вимірювальні прилади.
- Захисні кожухи: Використання кожухів або корпусів для захисту вимірювальних приладів від зовнішніх температурних змін.

### 7) Калібрування:

- Регулярне калібрування: Регулярне калібрування вимірювальних приладів з урахуванням температурних умов експлуатації дозволяє підтримувати їх точність.
- Тестові вимірювання: Проведення тестових вимірювань у контрольованих умовах для визначення температурних впливів і подальшої корекції основних вимірювань. [4, 5]

Найважливішими та найнеобхіднішими функціями для найпоширеніших вимірювальних інструментів таких, як штангенциркулі, мікрометри є температурна та математична компенсації похибок при вимірюванні. Вони забезпечують високу точність та швидкість вимірювань, при калібруванні та використанні у змінних температурних умовах. Ці методи компенсації мають переваги в порівнянні зі старими методами такими, як витримка інструменту 2–3 години на робо-

чому місці для стабілізації температурного впливу на виміри під час калібрування. А при використанні стає можливим процес вимірювання деталі відразу після обробки, без необхідності чекати поки її температура стабілізується.

**Висновок.** Дослідження та впровадження методів компенсації температурних впливів за допомогою сучасних комп'ютерних вимірювальних інструментів є важливим кроком до підвищення точності вимірювань, універсальності використання вимірювальних інструментів, скорочення часу на вимірів, можливість корекції вимірювальних параметрів, адаптація до індустрії 4.0 у сучасних умовах виробництва. Використання матеріалів з низьким КТР, температурне стабілізування, математична компенсація, вбудовані температурні датчики та інші методи дозволяють значно знизити вплив температурних змін на результати вимірювань. Таким чином це сприяє підвищенню якості продукції та зниженню витрат на її виготовлення.

### **Література**

1. Закон України № 1314-VII від 5 червня 2014 року «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. [http://content.lappgroup.com/fileadmin/DAM/Lapp\\_Ukraine/Kabelniy\\_myr/UA\\_Kabelwelt\\_01\\_/2015\\_small.pdf](http://content.lappgroup.com/fileadmin/DAM/Lapp_Ukraine/Kabelniy_myr/UA_Kabelwelt_01_/2015_small.pdf).
3. Рукавішников. П.В. Підвищення точності вимірів під час калібрування інструменту / П.В. Рукавішников, О.В. Роценко, О.С. Гарбуз, В.В. Оразалієв // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті : мат. Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р. – К. : АТМ України, 2024. – С 127–129:14:38
4. Garcia, M. Advanced Thermal Compensation Techniques for Industrial Metrology / M. Garcia, R. Lopez // Inter. J. of Industr. Eng. – 2019. – 29(2). – P. 98–112.
5. Liu, Y.S. Моделювання надійної компенсації термічної похибки верстатного інструменту на основі технології сегментації інтервалів, чутливої до температури / Y.S. Liu, E.M. Miao, H. Liu, Y.Y. Chen // Inter J Advans. Manuf. Technol. – 2020. – 106:655–669.

## **ПРОБЛЕМИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ**

У сучасному інженерному та науковому середовищі проблема точного та ефективного моделювання процесів мікрофрезерування має важливе значення для визначення оптимальних умов виготовлення мікроелементів виробів різного призначення.

Скінченно-елементне моделювання (СЕМ) процесу мікрофрезерування є складним завданням, що вимагає врахування багатьох факторів і вирішення низки технічних проблем.

Відтворення точних розмірів та форми інструменту та заготовки в малих масштабах вимагає високої деталізації геометричної моделі та сітки скінченних елементів, що суттєво збільшує вимоги до обчислювальних ресурсів комп'ютера.

Однією із проблем СЕМ є те, що стандартні моделі поведінки матеріалів, які представлені в базах даних програм скінченно-елементного аналізу, часто не враховують певні властивості конкретних матеріалів, наприклад при різному фазовому складі, після термічної обробки тощо. Так феноменологічне рівняння Джонсона-Кука ґрунтується на емпіричних даних і не враховує зв'язку між швидкістю деформації та температурою під час пластичної деформації матеріалу. Воно також не точно відображає характеристики зміцнення різних матеріалів. Модель Джонсона-Кука виражає швидкісне зміцнення, як лінійну функцію від логарифма швидкості деформації, що призводить до нелінійності межі текучості для багатьох металевих матеріалів. Це значно ускладнює моделювання процесів механічного оброблення матеріалів, схильних до зміни властивостей і структури приповерхневого шару.

У роботі [1] стверджується, що наразі немає жодної моделі з менш ніж 5% похибок у прогнозуванні сили різання, температури різання, форми стружки та її усадки одночасно. Це зумовлено переважно неточністю моделі тертя на передній поверхні інструмента, що суттєво впливає на точність визначення цих параметрів.

При мікрофрезеруванні контакт між інструментом та матеріалом заготовки відбувається на дуже малих площах, що ускладнює моделювання контактної взаємодії та зносу інструменту. У роботі [2] порівнювалися змодельовані та експериментальні значення сил різання під

час мікрофрезерування Inconel 718, при цьому похибка моделювання становила 6–23%. Як стверджують автори, різниця між результатами зумовлена переважно моделлю тертя, яка впливає на сили різання. Чисельне моделювання передбачає однорідні умови тертя між заготовкою та різальним інструментом і стабільні умови різання. Проте в реальних умовах, особливо при високошвидкісному мікрофрезеруванні, вібрації та знос інструменту впливають на процес обробки, однак ці параметри часто не враховуються в чисельному моделюванні.

Як відомо, у процесі мікрофрезерування на певних ділянках дуги контакту товщина стружки може бути меншою за мінімальну товщину зрізу. В такому разі утворення стружки не відбувається. Для уникнення цього ефекту варто визначати так звану мінімальну товщину зрізу, яка залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та геометричних параметрів інструменту. Тому при скінченно-елементному моделюванні таких процесів виникає проблема відтворення стружкоутворення через складність точного врахування всіх цих факторів. У роботі [3] 2D-скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування дозволило визначити відношення мінімальної товщини зрізу до радіуса різальної кромки мікрофрези при різних швидкостях різання.

Процес мікрофрезерування супроводжується виділенням значної кількості тепла, що впливає на термомеханічні характеристики інструменту та заготовки. Автори [4] розглядають моделювання теплових явищ у процесі мікрофрезерування, зокрема генерацію тепла внаслідок пластичної деформації матеріалу та тертя, що впливає на механічні властивості матеріалів, знос інструменту та якість обробленої поверхні. Врахування теплових ефектів дозволяє більш точно прогнозувати знос інструменту, що в свою чергу підвищує точність прогнозування сил різання і температурних полів в інструменті та заготовці.

Отже скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування є складним і багатогранним завданням, що вимагає вирішення численних проблем, пов'язаних з геометричною точністю, матеріальними моделями, моделюванням сітки, контактними взаємодіями, тепловими ефектами та обчислювальними ресурсами комп'ютера. Вирішення цих проблем є необхідним для розробки ефективних і точних СЕ моделей процесу мікрофрезерування.

## Література

1. Балицька, Н.О. Деякі проблемні аспекти моделювання процесів механічної обробки / Н.О. Балицька, Т.С. Юрчук // Зб. наук. праць XI Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнарод. участю «Процеси механічної

обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2021. – С. 120–122 с.

2. Uzun, İ. Finite element modeling of micro-milling: Numerical simulation and experimental validation / İ. Uzun, K. Aslantas, F. Bedir // Mach. Sci. and Technol. – 2016. – Vol. 20, №1. – P. 148–172.

3. Yu, X. . Finite Element Simulation and Analysis of Size Effect in Micro-Milling Process / X. Yu, Y. Sun, H. Liu // Appl. Mech. and Mat. – 2009. – Vol. 16–19. – P. 1159–1163.

4. Davoudinejad, A. 3D Finite Element Simulation of Micro End-Milling by Considering the Effect of Tool Run-Out /A. Davoudinejad, G. Tosello, P. Parenti, M. Annoni // Micromachines. – 2017. – Vol. 8, № 6. – P. 187.

*Храбан Д.В.* Державний університет  
«Житомирська політехніка», Житомир, Україна

## **ВІДНОВЛЕННЯ ВИЛКИ КАРДАННОГО ВАЛА ШЛЯХОМ НАПЛАВЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ**

Вилка карданного вала – важливий елемент механічних систем, що зазнає значних навантажень та зношування. Для продовження терміну служби використовують методи наплавлення поверхонь. Розглянемо основні аспекти технології наплавлення, матеріали та результати відновлення вилки карданного вала.

Зношування може бути викликане тертям, ударними навантаженнями, корозією та температурними деформаціями. Наплавлення є ефективним методом відновлення, що полягає у нанесенні шару металу на зношену поверхню для відновлення геометрії та покращення властивостей. Основні методи наплавлення: електродугове наплавлення, плазмове наплавлення, газове наплавлення. Матеріали для наплавлення: сталеві дроти з хромом і нікелем, сплави на основі кобальту та нікелю, порошкові суміші для плазмового наплавлення. Процес відновлення включає: підготовку поверхні, наплавлення, обробку після наплавлення. Випробування для оцінки якості включають перевірку міцності, твердості, зносостійкості та стійкості до корозії. Переваги: відновлення геометричних розмірів, збільшення терміну служби, можливість відновлення дорогих деталей. Недоліки: високі вимоги до підготовки поверхні, необхідність спеціального обладнання та матеріалів,

витрати на процес. Електромагнітне напилення дротом Hn-35 є сучасним методом, що включає нагрівання дроту до стану плазми і розпилення на поверхню деталі, забезпечуючи високу адгезію та експлуатаційні властивості. Метод наплавлення поверхонь ефективний для відновлення вилки карданного вала, подовжує термін служби деталей, знижує витрати на заміну та забезпечує надійність роботи механізмів.

### **Література**

1. Smith, J. Investigation of the Wear Resistance of Hn-35 Wire in Martensitic Steel Repair / J Smith // J. of Mat. Eng. and Perform. – 2020. – 29(5). P. 123–134.
2. Brown, T. Plasma Spraying Techniques for Surface Coating : An Overview / T. Brown, M. Green // Surf. Coat. Technol. – 2018. – 334. – P. 22–30.

## ЗМІСТ

<i>Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Комарова Г.Л.</i> ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ ІМПУЛЬСНИМИ ЛАЗЕРАМИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	3
<i>Бахман С.О., Мельничук П.П.</i> ЩОДО ПОШУКУ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР	6
<i>Бурикін В.В., Рижов Ю.Е., Чумак А.О., Клименко С.Ан.</i> ОБРОБКА СУЧАСНИХ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ В ЛІТАКОБУДУВАННІ	10
<i>Васильчук О.С., Виноградова О.П., Горохов В.Ю., Білорусець В.В., Плівак О.А.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНЕЙ МІЖ ПОВЕРХНЯМИ ПАРИ ТЕРТЯ «ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ АЛМАЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ (КАМ) ТА ГІРСЬКОЮ ПОРОДОЮ»	12
<i>Величкович А., Роп'як Л., Романів М.</i> АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТЕРЖНЯ З ПОКРИТТЯМ ПІД ЧАС ЦЕНТРАЛЬНОГО РОЗТЯГУВАННЯ ЧИ КРУ- ЧЕННЯ	15
<i>Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Кравчук А.В.</i> ГАРЯЧЕПРЕСОВАНА КЕРАМІКА ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК	19
<i>Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Кравчук А.В.</i> НОВІ НАПРЯМКИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ КАРБІДУ БОРУ ДЛЯ БРОНЬОВОГО ЗАХИСТУ	22
<i>Волошина Л.В., Харченко Б-А.О.</i> ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ В УКРАЇНІ	23
<i>Геворкян Е.С., Комарова Г.Л., Мартиросян С.Р.</i> ОТРИМАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ КЕРАМІКИ З УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ВИСОКОТВЕРДИХ СПЛАВІВ	25
<i>Девін Л.М., Ричев С.В., Нечипоренко В.М., Даніленко І.І.</i> ТОНКЕ КОСОКУТНЕ ТОЧІННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д20 МОНОКРИСТАЛОМ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ	28

<i>Драченко М.П.</i> ЕВОЛЮЦІЯ СХЕМ НЕІЗОЛЬОВАНИХ ПОНИЖУЮЧИХ КОНВЕРТОРІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ У ФОРМУВАЧАХ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ	32
<i>Жерносеков А.М., Римар С.В.</i> ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ	35
<i>Ziakhor I.V., Levchuk A.M., Shylo Yu.A., Koltsov V.V., Zavertannyi M.S.</i> PRESSURE WELDING OF NICKEL SUPERALLOYS USING NANOLAYERED FOILS	37
<i>Ищенко А.О., Рассохін Д.О., Кравченко В.М., Носовська О.В.</i> ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ ПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС І ГЗК	41
<i>Клименко С.А., Клименко С.Ан., Манохін А.С., Копейкіна М.Ю., Чумак А.О., Мельнійчук Ю.О., Литовченко С.В.</i> КОНТАКТНЕ РУЙНУВАННЯ ПОКРИТТІВ TiCN, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАДЖЕННЯ	43
<i>Клименко С.А., Копейкіна М.Ю.</i> ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ P <sub>c</sub> BN	45
<i>Клименко С.А., Мельнійчук Ю.О., Манохін А.С., Клименко С.Ан., Копейкіна М.Ю., Чумак А.О., Муковоз С.Ю.</i> ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ TiN <sub>b</sub> N/CrN НАНЕСЕНИХ НА РОБОЧІ ПОВЕРХНІ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПКНБ	48
<i>Комарова Г.Л., Волошин Д.І., Чичин Є.В.</i> ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: КОНТРОЛЬ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ	51
<i>Комарова Г.Л., Каишур А.П.</i> ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ: МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ	53
<i>Коротинський О.Є., Вертецька І.В.</i> ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИВАЧІВ НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ У ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ	56

<i>Коротинський О.Є., Жерносеков А.М., Вертецька І.В.</i> ВИКОРИСТАННЯ ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ	58
<i>Кузін О.А., Копилов В.І., Кузін М.О.</i> ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ СТРУКТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КОЛІСНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ ЗМІЦНЕННІ	61
<i>Лавріненко В.І.</i> СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ПОЛІРУВАННЯ, ЯК ПРИКЛАД СПРЯМОВАНОГО ДОСЯГНЕННЯ ВИСОКОЯКІСНОЇ РІЗАЛЬНОЇ КРОМКИ ІНСТРУМЕНТУ	63
<i>Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д., Логінова О.Б., Смоквина В.В., Зайцева І.М., Котинська Л.Й., Тимошенко В.В., Барановська К.А.</i> ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІНТЕТИЧНИХ АЛМАЗНИХ ІШЛІФПОРОШКІВ З РІЗНИМ ВМІСТОМ ВНУТРІКРИСТАЛІЧНИХ МЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ	69
<i>Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д., Смоквина В.В., Солад В.Ю., Музичка Д.Г.</i> СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАЯВНОСТІ АДСОРБОВАНОЇ ВОДИ ТА ГІДРОКСИЛЬНИХ ГРУП НА ПОВЕРХНЯХ АЛМАЗІВ ТА СУПУТНИХ МАТЕРІАЛАХ	71
<i>Лавріненко В.І., Полторацький В.Г., Петасюк Г.А., Солад В.Ю., Гумаров О.В.</i> СУЧАСНІ РОЗРОБКИ В НАНЕСЕННІ ТА ЗАСТОСУВАННІ cBN- ПОКРИТТІВ НА АЛМАЗНУ МАТРИЦЮ	76
<i>Логінова Ю.В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ З ОРГАНІЗАЦІЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ВИГОТОВЛЕННЯМ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	79
<i>Лопата О.В., Лопата В.Н., Солових Є.К., Забойкіна Н.П.</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ПРИ РЕМОНТІ СПЕЦТЕХНІКИ	81
<i>Лопата Л.А., Солових А.Е., Катеринич С.Є.</i> ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ШВИДКО ЗНОШУЮТЬСЯ, ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ ПРИПІКАННЯМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	85

<i>Матошин О.В., Вислоух С.П., Антонюк В.С., Волошко О.В.</i> ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ	88
<i>Ночвай В.М., Полонський Л.Г., Громовий О.А.</i> ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ СПРАЦЬОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАЛЬНИКА ГН-2	92
<i>Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А., Базалій Г.А., Заболотний С.Д.</i> ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПІДГОТОВКИ ТА ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ НА МОРФОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКУ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ, ВІДПОВІДАЛЬНІ ЗА РОЗВИНУТІСТЬ ПОВЕРХНІ ТА РІЗАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЗЕРЕН	93
<i>Орел В.М., Саленко О.Ф., Скрипник В.С., Савелов Д.В., Деревнко А.І., Гаврушкевич Н.В.</i> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗОВАНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ, ВИКОНАНИХ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ	95
<i>Павлова Г.О.</i> ДО ПРОБЛЕМИ РЕМОНТУ СПЕЦІАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	99
<i>Прокоф'єв О.С., Губатюк Р.С., Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Абдулах В.М.</i> ПОВТОРНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ІНДУКЦІЙНЕ ТЕРМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ ЗОН ЗНЕМІЦНЕННЯ ЗВАРНИХ СТИКІВ РЕЙОК	100
<i>Рябченко С.В.</i> ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛІС КРУГАМИ З РУБІН-КОРУНДУ	104
<i>Сахнюк І.О.</i> ГАРМОНІЗАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯКОСТІ УКРАЇНИ З СИСТЕМОЮ ЄДИНОГО РИНКУ ЄС	105
<i>Соловійов В.Г., Романова І.Ю.</i> ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМОПІДВІДНОГО КРИСТАЛІЗАТОРА НА ФОРМУ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ ТА ПРОЦЕС НАПЛАВЛЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ	108
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В.</i> ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ АЛМАЗНО- АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ НА ЗНОШУВАННЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО КРУГА	110

<i>Тарельник Н.В.</i> НАПРАВЛЕНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БАБІТОВИХ ПОКРИТТІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ НАСОСІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	116
<i>Тимофєєва Л.А., Сергєєв О.В., Волошина Л.В.</i> КАЛІБРУВАННЯ СУБМІКРОННОГО МІКРОМЕТРА У МЕТРОЛОГІЧНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ: ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ВІДТВОРЮВАНОСТІ	118
<i>Тимофєєв С.С., Роценко О.В., Рукавішников П.В., Козловська І.П.</i> ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ СУЧАСНИМИ КОМП'ЮТЕРНИМИ ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ	121
<i>Томашевський О.О., Балицька Н.О.</i> ПРОБЛЕМИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ	125
<i>Храбан Д.В.</i> ВІДНОВЛЕННЯ ВИЛКИ КАРДАННОГО ВАЛА ШЛЯХОМ НАПЛАВЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ	127

# ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ТА РЕНОВАЦІЯ ВИРОБІВ

Матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції,  
26–27 червня 2024 р., Київ

*Мови конференції: українська, англійська*

Комп'ютерна верстка  
Копейкіна М.Ю.

Підписано 25.06.2024  
Формат 60×84×1/16  
Умч. вид. арк. 12,0.

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