



Всеукраїнська громадська організація
Асоціація технологів-машинобудівників України
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України
ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»
ТОВ «НПП РЕММАШ»

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

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ТА РЕНОВАЦІЯ ВИРОБІВ

**Матеріали 25-ї Міжнародної
науково-технічної конференції**

10–12 червня 2025 р.

Київ – 2025

УДК 658.516

Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 10–12 червня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2025. – 116 с.

іSBN 978-617-581-674-5

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

УДК 658.516

іSBN 978-617-581-674-5

© АТМ України, 2025

© ПП «Рута», 2025

СУЧАСНА МЕТОДОЛОГІЯ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

У сучасному матеріалознавстві центральною проблемою є прогнозування властивостей матеріалів і керування технологічними процесами їхнього отримання. Вирішення цієї проблеми можливе на основі певної методології, що базується на встановленні функціонального зв'язку між ланками матеріалознавчої тріади “технологія – структура – властивості”. Технологія припускає знання закономірностей кінетики таких взаємозалежних явищ як спікання, фазові перетворення, кристалізація й рекристалізація, впливаючи на які можна регулювати структурний стан матеріалів і, в остаточному підсумку, їхні властивості.

Загальною тенденцією в створенні нових інструментальних матеріалів є орієнтація на певний клас оброблюваних матеріалів гамма яких весь час розширюється, при цьому вимоги щодо забезпечення високої продуктивності процесів механічної обробки не змінюються. Зважаючи, що практична спрямованість таких досліджень полягає в отриманні нових композиційних надтвердих матеріалів основними службовими характеристиками яких є твердість та зносостійкість, в даний час розроблена велика кількість технологій отримання матеріалів, як монофазного складу, так і композитів, які застосовуються в різних областях техніки. Ці обставини спонукають до подальшого розвитку досліджень традиційних надтвердих фаз і матеріалів на їх основі з метою встановлення їх технічних можливостей, оптимізації та управління властивостями, а також пошук областей ефективного застосування.

Узагальнення накопичених результатів досліджень та їх аналіз може слугувати базовою складовою нових підходів при розробці керамічних матеріалів з широким спектром мікроструктурного стану, які можуть сприяти підвищенню службових характеристик в умовах експлуатації. Типовим представником таких компонентів в яких поєднуються висока міцність і зносостійкість, є надтверді матеріали на основі нітриду бору типу композит 10 в яких це реалізується за рахунок формування визначеного його структурного стану. Вони відзначаються наявністю ультра дисперсної фазової складової, яка слугує

матрицею для іншої твердої фази, при цьому слід зазначити, що їх присутність сприяє умовам формування композитів за рахунок сумісності цих фаз, які мають високу міцність міжфазних границь та близькі значення коефіцієнтів термічного розширення та пружних констант.

Результати попередньо виконаних експериментальних робіт і аналіз впливу різних технологічних факторів на хід структурних і фазових перетворень при спіканні вюртцитного нітриду бору, на формування фізико-механічних і експлуатаційних характеристик ПНТМ свідчать, що основний вплив має присутність графітоподібного нітриду бору в матеріалі.

Утворення BN_r можна уникнути шляхом попередження зворотного фазового переходу $BN_b \rightarrow BN_r$ за рахунок деформаційного активування зі зсувною компонентою порошоків BN_b , коли має місце нагромадження нерівноважної концентрації дефектів в об'ємі кристалів. При цьому має місце фрагментація часток порошку, що перебувають у зоні максимальних напруг і підданих дії зрушення. На контакті часток при високому полі напруг може досягатися межа міцності матеріалу й відбуватися руйнування твердого тіла та диспергування. Зміна співвідношення між поверхнею й об'ємом, поява на поверхні ділянок з надлишковим запасом енергії приводить до зміни кількості потенційних центрів зародкоутворення при різних топохімічних реакціях. Крім того, якщо розміри часток стають менше критичних, має місце класична деформація і нагромадження дефектів без утворення нової поверхні. Концентрація енергії на контакті часток сприяє їхній агрегації, а релаксація поля напруг може привести до утворення дефектів кристалічних ґраток, які відповідальні за прискорення поліморфних переходів.

Стабільна фаза, що виникає при цьому в процесі спікання композиції при високих тисках і температурі, утворюється в умовах поліморфного перетворення вюртцитного нітриду бору в сфалеритну модифікацію, яка складає основу її формування. Композиційний матеріал характеризується вмістом в межах його зерен твердого розчину $BN-C$, виникнення якого сприяє значному підвищенню твердості та можливостей практичного застосування.

ЗМОЧУВАНІСТЬ ФРЕЗЕРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВУ NiTi

Поверхнева вільна енергія та мікрорельєф твердих поверхонь визначають їхню змочуваність. Для поверхні із заданою вільною енергією зміна топографії може застосовуватися для керування змочуваністю [1]. Різні методи лезової обробки створюють на поверхнях різний поверхневий мікрорельєф і таким чином змінюють їх змочувальні властивості.

Для дослідження впливу топографії поверхні сплаву NiTi на її змочувальні властивості було проведено експеримент, окремі результати якого представлені на рис. 1. Досліджувався кут змочування (θ) водою поверхонь з різною топографією, виготовлених поліруванням (рис. 1, *а*), торцевим фрезеруванням (рис. 1, *б*) [2] та мікрофрезеруванням (рис. 1, *в*) [3].

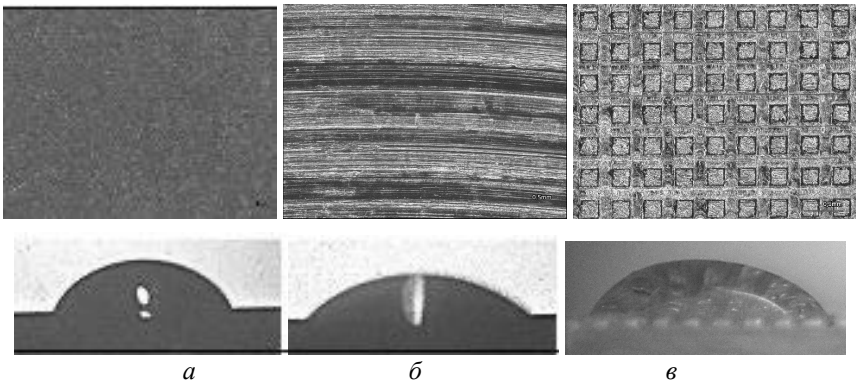


Рис. 1 – Поверхні сплаву NiTi та крапля води на них:

а – полірована поверхня (Ra 0,07; $\theta = 52^\circ$); *б* – фрезерована поверхня (Ra 0,94; $\theta = 45^\circ$); *в* – поверхня, текстурована мікрофрезеруванням (0,2×0,2×0,1 мм; $\theta = 76^\circ$)

Отримані результати свідчать, що кут змочування початково гідрофільних ($\theta = 52^\circ$) поверхонь сплаву NiTi після торцевого фрезерування зменшується до 28–46°, залежно від застосовуваних режимів різання. При цьому для поверхневих текстур різного типу (мікропази, мікростовпчики, мікроканавки), виготовлених мікрофрезеруванням, кут змочування змінюється в межах 50–98°.

Таким чином, попередні експериментальні дослідження доводять можливість керування змочуваністю поверхонь сплаву NiTi за рахунок фрезерного текстурування. В подальших дослідженнях планується більш розширено дослідити вплив топографії фрезерованої поверхні на поведінку змочування сплавів NiTi.

Література

1. Du H., Wu C., Li D., Yip W.S., Wang Z., To S. (2023) Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.214>
2. Балицька Н.О. Крайовий кут змочування поверхонь сплаву NiTi після торцевого фрезерування (2025). *Технічна інженерія*, 1(95).
3. Балицька Н.О., Мельничук П.П. (2025). Мікрофрезерування, як спосіб текстурування поверхонь сплавів Ni-Ti для модифікації змочуваності. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 347(1), 478–485. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-65>.

Бурикін В.В., Мановицький О.С. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ У ВИРОБАХ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Останніми роками для літальних апаратів усе більш широке застосування знаходять композитні матеріали (КМ), наприклад вуглепластики, що мають високу міцність або високу пружність під час розтягування. Згідно специфікації "вуглепластик" означає пластик, зроблений атмосферною термоформовкою або термоформовкою під тиском препрега, який отримують просоченням вуглецевих волокон смолою матриці, або двох або більше препрегов, укладених один на інший. Елементи, сформовані з вуглепластика, встановлюються у виробу з використанням кріпильних елементів, таких як болти або заклепки. Тому, для створення великої кількості якісних отворів потрібний надійний різальний інструмент.

Для формування отворів в КМ зазвичай використовують свердла. При обробці КМ, особливо армованих вуглецевими волокнами, термін служби свердла надзвичайно короткий внаслідок високої абразивної

здатності високомодульних наповнювачів та впливу реактопластичних смол матриці КМ. При зношуванні інструменту суттєво погіршується якість оброблених отворів – оброблений отвір менший діаметр, волокна розщеплюються, шоркстість зростає. Волокна, що входять в КМ, не розрізаються, а залишаються у вигляді уламків на поверхні обробленого отвору, а шари препрега, що утворюють КМ, можуть розшаруватися.

Висока якість отворів в деталях з КМ може бути досягнута за рахунок використання свердел з ПНТМ. При цьому зниження дефектності, а саме розшарування, ворсистості, пошкоджень поверхні отвору та конусності отвору може бути вирішене за рахунок конструктивних особливостей інструменту. Існує алмазне свердло, (патент України на кор. модель № 112821, Бюл. № 2 від 26.12.2016), яке оснащено АТП. Інструмент виконаний з геометричними параметрами різальної частини $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 40^\circ$, $\alpha_3 = 7^\circ$, $\gamma = 4^\circ$, $2\varphi = 120^\circ$. Головною особливістю інструменту є наявність допоміжних різальних кромки, які розташовані під кутом $\varphi_1 = 0^\circ$, тобто – паралельно осі обертання свердла. Тобто, у даного свердла відсутня зворотня конусність, що зменшує дефектність отриманих отворів. Недоліком такої конструкції свердла є наявність прямого кута і ступінчастого переходу між різальною пластиною і корпусом свердла при переході між допоміжною різальною кромкою і корпусом свердла, що зменшує його ефективність на зворотньому ході. При проникненні свердла на прямому ході глибше нижньої поверхні листового матеріалу, що просвердлюється, і наявності мінімальної неспіввідповідності між діаметрами свердла і просвердленого отвору можуть мати місце випадки некоректного входу свердла в отвір на зворотньому ході. У разі наявності цього нижня поверхня листового матеріалу буде знаходитися у проміжку між корпусом свердла і його різальною частиною. Це може спричинити значні дефекти в отворі та призвести до деструкції та розшарування композита, що оброблюється, на зворотньому ході свердла, коли не відбудеться збігу осі отвору і осі обертання свердла.

Для усунення цього недоліку пропонується така конструкція свердла (рис. 1, а), коли на різальному лезі між допоміжною кромкою свердла і стінкою корпуса свердла створюється ще одна перехідна допоміжна різальна кромка за рахунок створення двох тупих кутів як на різальній частині, так і між нею і стінкою свердла з утворенням додаткового кута в плані φ_1 . На такій перехідній кромці також утворюється задній кут α_0 для запобігання затиранню між різальною частиною і циліндричною поверхнею отвору. Наявність такої допоміжної різальної кромки дозволяє додатково зрізати розпушені волокна і поліпшує центровку при входженні свердла в отвір на зворотньому ході.

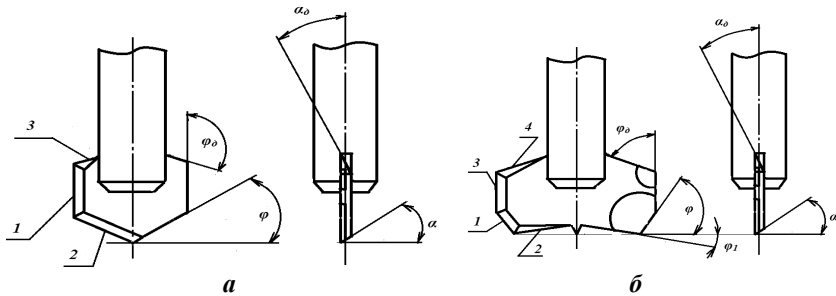


Рис. 1 – Перове (а) і трепануюче свердла для обробки отворів у КМ

Якщо потрібно утворювати переважно в листових КМ отвори великого діаметра, доцільно застосовувати свердла трепануючого типу. Для такого типу інструментів, при порівняно невеликих розмірах елементів з ПНТМ, треба вирішувати питання їх розміщення на корпусі свердла.

Трепануюче свердло (рис. 1, б) при утворенні отвору здійснює прорізування КМ вершиною свердла, утвореною перетином головної 1 і допоміжної 2 ріжучих крайок свердла, виготовлених під головним кутом в плані φ і допоміжним кутом в плані φ_1 . Бокова внутрішня поверхня отвору формується зазначеною вершиною і боковою допоміжною різальною кромкою свердла 3, яка сформована паралельно осі обертання інструменту і має задній кут α .

Така конструкція леза свердла дозволяє формувати боковою допоміжною різальною кромкою 3 для якісної обробки поверхні отвору. Проте, по мірі затуплення вершин і різальних кромки свердла може мати місце неповне перерізання волокон КМ з утворенням ворсистості від залишків обірваних волокон наповнювача. На прямому робочому ходу свердла владена середня частина, прорізана головною і допоміжною різальними крайками, випадає по прямому ходу свердла, яке проходить у отвір і на зворотньому ходу дорізає не перерізані на прямому ходу залишки волокон за допомогою зачисної різальної кромки 4. Ця кромка утворює з боковою допоміжною кромкою 5 допоміжний кут φ_0 . На такій перехідній кромці також утворюють задній кут α_0 для запобігання затиранню між робочою частиною свердла і поверхнею отвору.

Така конструкція трепануючого свердла дозволяє інструменту на зворотньому ходу плавно входити в отвір завдяки тому, що при обертанні допоміжна зачисна різальна кромка утворює конус обертання, забезпечуючи формування обробленої поверхні отвору високої якості.

ПОКРАЩЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ МАШИНАМИ РЕМОНТНОГО ВИРОБНИЦТВА МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ

Гібридна обробка виробів використовується на ремонтних виробництвах разом з новими сучасними засоби, які використовують ріжучі інструменти та засоби вимірювальної техніки [1]. Багато параметрів при сучасному ремонті виробів здійснюється координатно-вимірювальними машинами (КВМ) з врахуванням координат як в площині так і в просторі для визначення або контролю окремих геометричних величин. Застосування в сфері залізничного транспорту координатного способу представлення полігону з розташованими на ньому стаціонарних об'єктів контролю та рухомих одиниць[2] досліджується о багатьох роботах галузі. Наведена публікація висвітлює метод де контролюється положення рухомих одиниць в лінійному вимірі та розраховується безпечний інтервал попутного слідування. Оприлюднений координатний метод покращить якість експлуатації залізничного транспорту. Однак інший погляд на якість інформаційно-вимірювальних систем на залізничному транспорті розглядається в роботі [3]. Проведення випробувань комплексів технічних засобів керування на прикладі ремонтного виробництва виробів з електронними компонентами аналізуються в роботі [4] з підсиленням уваги на якість методик аналізу розрахунку надійності та безпечності апаратної реалізації виробів проаналізовано в праці[5] і доведено вплив апаратних та програмних компонентів продукції від мікроконтролерних елементів до застосунків верхнього рівня [6]. Перегляд методик нормування розрахунку надійності електронних компонентів автоматики [7] підвищує якість ремонтного виробництва та створення нової продукції. Однак враховуючи сучасні можливості покращення вимірювання геометричних величин координатно-вимірювальними машинами, описані в роботі [8], слід розвивати покращення за рахунок модернізації програмного забезпечення.

Ця робота пов'язана із вирішенням питання зменшення метрологічної невизначеності в координатно-вимірювальних машинах з підвищенням точності вимірювань та контролю геометричних величин ремонтних робіт.

В роботі [9], авторами встановлюється та визначаються терміни «невизначеність вимірювання». Для підвищення точності вимірювань, зокрема розмірів, що мають критичне значення, при використанні координатно-вимірювальних машин важливим є зниження рівня невизначеності. Під невизначеністю вимірювання розуміють параметр, який описує діапазон можливих значень, що можуть бути обґрунтовано віднесені до результату вимірювання

Відповідне оцінювання ступеню невизначеності, зокрема, одного з типів невизначеності, доцільно проводити шляхом статистичного аналізу результатів повторних вимірювань за формулою:

$$U_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{сеп})^2}$$

де i – порядковий номер конкретного результату з переліку повторних вимірювань, n – кількість результатів повторних вимірювань.

Таким чином, є доцільним розробляти програму вимірювань для КВМ з урахуванням певної кількості повторних вимірювань важливих розмірів. Також необхідно мати відповідну програму статистичного аналізу результатів повторних вимірювань. Ця програма може бути додана до програмного забезпечення КВМ, якщо це є технічно можливим, або бути такою, що виконується на зовнішньому комп'ютері.

Настанова з вираження невизначеності вимірювання чітко демонструє залежність вимірювань від алгоритму та особливо від вхідних параметрів алгоритму та програмного забезпечення яке при модернізації доцільно удосконалити і, як наслідок, таким способом удосконалити метрологічне забезпечення й підвищити точність вимірювань КВМ.

При зазначеній модернізації будуть зменшені похибки та підвищені окремі параметри експлуатації програмного забезпечення. Однак слід визнати доцільним проведення більш ретельних, комплексних та ґрунтовних досліджень з зазначених проблемоутворюючих протиріч для встановлення норм (числових значень) оптимального розширення даних та удосконалення алгоритму і програмного забезпечення для КВМ.

Таким чином, удосконалення алгоритмів, вхідних даних та модернізованого програмного забезпечення за зазначеними методами має дозволити підвищення точності вимірювань і зменшення невизначеності вимірювань. Зменшення невизначеності вимірювань за рахунок оптимізації алгоритмів може стати рушієм для створення цілої низки класифікацій випадків та застосунків які дають можливість в певних випадках проведення вимірювань підвищувати та/або зменшувати кількість вимірів з метою оптимізації процесу вимірювання як за крите-

рієм якості/точності так і за критерієм швидкості/економічності. Саме таке створення «динамічної норми» дозволить оптимізувати вимірювання КВМ та підвищити ефективність ремонтну, відновлювальних робіт з виробами як загального так і транспортного призначення.

Література

1. Salenko, O., Klymenko, S., Orel, V., Kholodny, V., Gavrushkevich, N. Using the functional approach in the development of hybrid processes in engineering: theoretical base / O. Salenko, S. Klymenko, V. Orel, V. Kholodny, N. Gavrushkevich // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – Vol. 6, № 1. – P. 41–55.
2. Modeling of vehicle movement in computer information-control systems / V. Moiseenko, O. Golovko, V. Butenko, K. Trubchaninova // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2022. – № 1(101). – P. 36–49.
3. Якість інформаційно-вимірювальних систем на залізничному транспорті України // *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. – Харків : УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 99. – С. 151–155.
4. Мойсеєнко, В. І., Бутенко, В. М., Головка, О. В., Чуб, С. Г. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 31–38.
5. Бутенко, В. М., Головка, О. В., Чуб, С. Г. Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами / В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб // *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. – Харків : УкрДУЗТ, 2023. – № 204. – С. 115–124.
6. Мойсеєнко, В. І., Бутенко, В. М., Соколов, А. К., Яранцев, В. Розробка мобільного додатку подорожувальника / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, А. К. Соколов, В. Яранцев // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2024. – № 2. – С. 18–24.
7. Бутенко, В. М. Перегляд методик нормування розрахунку надійності електронних компонентів автоматики / В. М. Бутенко // *Якість, стандартизація, контроль : теорія та практика : матеріали 24-ї Міжнародної наук.-практ. конф., 24–26 вересня 2024 р.* – Київ : АТМ України, 2024. – С. 32–34.
8. Бутенко, В. М., Чуб, С. Г. Сучасна можливість покращення вимірювання геометричних величин координатно-вимірювальними машинами / В. М. Бутенко, С. Г. Чуб // *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості та на транспорті : матеріали Міжнародного*

наук.-техн. семінару, 25–26 березня 2025 р. – Київ : АТМ України ; Житомир : ПП "Рута", 2025. – С. 18–20.

9. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2009. Невизначеність вимірювання. Ч. 3. Настанова з вираження неvizначеності вимірювання (GUM:1995). – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – 110 с.

Вислоух С.П., Волошко О.В., Юрковець В.І.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЄДНАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Складання циліндричних з'єднань у приладобудуванні складає близько 40% усіх складальних операцій, при цьому автоматизація цього процесу залишається актуальною і для підвищення її ефективності все більше застосовуються роботизовані системи, в основі роботи яких закладено математичне моделювання процесу поєднання [1].

Більш ніж 80% робіт розглядають вертикальний процес складання для схем типу «вал-втулка», де вал закріплений в хваті маніпулятора і центрується відносно базової деталі (втулка). Відповідно для підвищення ефективності автоматизованого складання, доцільно застосовувати і схему поєднання «втулка-вал». Відповідно, якість і надійність процесу автоматизованого складання залежить не тільки від механічних переміщень деталей відносно один одного, але й від схеми складання.

Для підвищення ефективності автоматизованого складання циліндричних деталей широко застосовують роботизовані системи, що керують процесом складання для різних схем складання за допомогою комп'ютерних програм, розрахованих на основі реального експеримента, або на основі математичного моделювання процесу поєднання.

Для вертикальних схем складання актуальною проблемою залишається зменшення сил взаємодії в точках контакту між деталями, які значно збільшуються при зменшенні кута між осями.

В роботах [2], [3] представлено математичну модель поєднання деталей із застосуванням вібраційного пристрою, що задає базовій деталі коливальні рухи. Приведені розрахунки визначають центр мас приєднувальної деталі (вала) відносно вібруючої базової деталі (втулки), що є недостатнім для визначення орієнтації і сил взаємодії деталей.

Дослідження процесу складання, при якому приєднувальній деталі (вала) задається крутний момент, проведено в роботі [4] в якій для спрощення розрахунків вала задають властивості гіроскопа, що не зовсім чітко відображає динаміку рух деталі.

В опублікованих роботах описується єдиний принцип вертикального поєднання деталей «вал-втулка», де «вал» приєднувальна деталь а «втулка» базова. Проте для підвищення ефективності автоматизованого складання слід дослідити поєднання деталей типу «втулка-вал», де «втулка» приєднувальна деталь а «вал» базова.

Тому метою даної роботи є моделювання процесу вертикального поєднання вісесиметричних деталей шляхом визначення мінімальних сил взаємодії в точках контакту між приєднувальною деталлю «втулка» і базовою «вал» із застосування крутного моменту.

В роботі розглядається процес поєднання циліндричних деталей з гарантованою щільністю для вертикальної схеми складанням, при якій вал закріплюється нерухомо у вертикальному положенні, а втулка центрується зверху, після чого їй задається необхідний рух для поєднання деталей між собою. На початку поєднання кут між осями втулки і вала γ відповідає контакту деталей в трьох точках, тобто

$$\gamma > (\arccos d)/D,$$

де d – діаметр вала, D – діаметр отвору втулки.

Одна з точок коонтакту розташована між твірною втулки і вала в площині, що проходить через вісі деталей, дві інші розташовані між кромками обох деталей симетрично цій площині. При значеннях $\gamma \leq (\arccos d)/D$ процес поєднання проходить при контакті в двох точках.

Переміщення втулки в середину вала відбувається тільки при зменшенні кута γ , коли відбувається поєднання обох вісей деталей.

Відповідно, плоскопаралельний рух втулки, що характеризує зменшення кута γ , є складальним рухом, що приводить до поєднання деталей, обертальний рух приєднувальної деталі не впливає на переміщення втулки по кромці вала, проте впливає на сили взаємодії в точках контакту деталей.

При автоматизованому складанні вісесиметричних деталей із гарантованим допуском використовувався метод осьового поєднання. Відносне позиціонування досягається завдяки забезпеченню деталей на позиції складання такого відносного розташування, при якому їх осі стають паралельними і знаходяться на відстані, що не перевищує половини гарантованого зазору

$$\delta = 0,5(D - d).$$

Поєднання деталей при такій умові досягається за допомогою відносного поступового переміщення втулки, паралельно осі валу. Осьове з'єднання вимагає високої точності відносного позиціонування, а отже, високої точності складального устаткування. Осьове з'єднання в залежності від параметрів деталей і допуску в з'єднанні можливе при кутах перекоосу, що становлять $0,10-0,15^\circ$.

З метою підвищення точності відносного позиціонування застосовуються фаски, та різноманітні вловлювачі. Проте у автоматизованому складанні, важко забезпечити паралельність осей приєднувальних деталей без маніпуляторів.

При відносному позиціонуванні деталей, при якому контакт між ними відбувається в одній точці між твірною валу і кромкою отвору втулки, кут між осями деталей γ може бути будь-яким, проте величина занурення втулки на висоту валу в процесі поєднання має бути достатньо малою і не повинна перевищувати значення:

$$h \leq \sqrt{D^2 - d^2},$$

де h – висота втулки, D – діаметр втулки, d – діаметр валу.

В іншому випадку, контакт між внутрішньої кромки втулки, та твірною вала не можливий, а осі деталей не будуть паралельними.

При правильному відносному позиціонуванні деталей, складальний рух втулки задається обертальним навколо осі, що проходить через точку контакту перпендикулярно площині симетрії деталей, обертання триває до моменту, коли осі деталей стануть паралельними, після чого деталям повідомляється відносно поступальне рух. У цих випадках заклинювання та пошкодження деталей виключено. Даний спосіб складання використовують для деталей, що легко ушкоджуються, та мають досить великий зазор у з'єднанні.

В результаті неточного попереднього орієнтування втулка може спиратись на дві точки кромки, при цьому нижня частина внутрішньої кромки втулки зайде всередину площини валу, без попереднього контакту в одній точці. В такому випадку поєднання деталей неможливе.

Найбільш поширеним варіантом відносного позиціонуванні деталей на позиції складання є контакт деталей в трьох точках.

Одна з точок розташована в площині симетрії між кромкою отвору втулки і твірною вала, а дві інші точки – між кромками обох деталей симетрично площині, яка проходить через їх вісі. Такий стан характеризується значенням кута $\gamma > \arccos(d/D)$. В процесі складання кут нахилу між деталями γ зменшується, симетричні точки при $\gamma = \arccos(d/D)$ поєднуються в одну.

Даний метод складання відрізняється тим, що не вимагає високої точності відносного позиціонування деталей на позиції складання.

Для визначення складального руху деталей, необхідно визначити геометричні параметри відносного позиціонування деталей при контакті в трьох точках.

Значення координат центру мас при контакті деталей у двох точках збігаються з формулами, отриманими для координат центру мас при контакті деталей у трьох точках. Таким чином, траєкторія розміщення центра мас є неперервною кривою при переході від контакту трьох точок до контакту в двох точках.

Отримані координати центра мас втулки і точки перетину вісей деталей дозволяють визначити стан вісі втулки в процесі поєднання в залежності від кута між вісями деталей γ .

Сили, що прикладені до втулки зі сторони маніпулятора забезпечують плоскопаралельний рух і крутний момент.

Зміщення деталей відбувається при зменшенні кута нахилу між осями деталей.

Таким чином, рух втулки опирається на три точки кромки вертикально закріпленого валу і описується системою з цих трьох диференційних рівнянь, що визначають закономірності руху втулки і сили взаємодії деталей в залежності від складальних зусиль і складального моменту при контакті між ними у трьох точках.

Висновки. Описана закономірність процесу поєднання деталей триточковому контакті під час вертикального плоско-паралельного руху для схеми типу «втулка-вал» з ефектом обертання приєднувальної деталі. Диференційні рівняння дозволяють визначити значення сил в точках контакту, встановити степінь їх впливу на процес складання та відслідковувати процес поєднання деталей типу «втулка-вал». Перспективним напрямком використання цієї моделі складання деталей може бути синтез системи, що забезпечує необхідні характеристики процесу складання а також комп'ютерне моделювання процесу складання вісесиметричних деталей для вертикальної схеми типу «втулка-вал».

Література

1. Юрковець В.І, Вислоух С.П., Антонюк В.С. Моделювання послідовності складання вісесиметричних деталей // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т

«Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 110–116. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).15

2. M. W. Adbullah, H Roth. M. Weyrich and J. Wahrburg. / An approach for peg-in-hole assembling using intuitive search algorithm on human behavior and carried by sensors guided industrial robot, IFAC-PapersOnLive 48(3), 1476-1481 (2015)

3. K. Van Wyk, M. Culleton, J. Falco and K. Kelly. Comperative peg-in-hole testing of a force-based manipulator control robotic hand, IEEE Transactoins on Robotics 34(2), 542-549 (2018)

4. L.B. Chernyakhovskaya, D. A. Simakov, Peg-in-Hole. Fundamental Principles of a Peg Leaning on a Horizontal Hole Edge, Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRL), Adv. Sci. Technol. Res. J. 2017; 11(4).

Волошина Л.В., Роценко О.В., Шупіло Р.Г.
Український державний університет
залізничного транспорту, Харків

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ЛІНІЙНО-КУТОВИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Актуальність калібрування лінійно-кутових засобів – зокрема косинців, кутників, шаблонів – стрімко зростає через високі вимоги до точності в сучасному приладобудуванні, машинобудуванні, 3D-вимірюваннях та контролі монтажних площин [1, 2]. Сьогоднішні підходи до калібрування, базовані на ручному або оптико-візуальному методі, не відповідають вимогам цифрової простежуваності, автоматизованої обробки результатів та прогнозованої невизначеності [3, 4]. Це потребує переходу до адаптивних методик, які інтегрують цифрові інформаційно-вимірювальні технології (ІВТ).

Класична процедура калібрування лінійно-кутового інструменту передбачає порівняння зазору або оптичного ефекту на стику поверхонь з еталоном, із наступним ручним розрахунком відхилення:

$$\Delta\theta = \arctan(L/h) \approx L/h, \quad (1)$$

де $\Delta\theta$ – кутова похибка, h – зазор, L – довжина робочої поверхні. Цей підхід обмежений суб'єктивністю зчитування, нестабільністю контакту й неможливістю статистичної верифікації результатів [1].

Адаптивна методика калібрування передбачає використання цифрових інклінометрів, поворотних енкодерів, триангуляційних лазерних датчиків і платформ з автоматичним позиціонуванням [2]. Процес калібрування інтегрується у цифрову платформу лабораторії з підтримкою бази еталонів, схем коригування, шаблонів поправок та автоматичним обчисленням невизначеності. Ця методика дозволяє створити більш гнучкий процес калібрування, що автоматично адаптується до:

- номінального кута інструменту (30°, 45°, 60°, 90°, тощо),
- геометрії деталі (внутрішня/зовнішня),
- класу точності (1, 2, 3),
- довжини робочої поверхні (від 50 мм до 1000 мм),
- типу поверхні (сталь, кераміка, композити).

Адаптивність методики реалізується через вбудований алгоритм вибору кількості точок вимірювання, режиму стабілізації та типу коригування. Похибка розраховується за розширеною моделлю:

$$\Delta\theta_{\text{заг}} = \theta_{\text{енкодер}} + \Delta_{\text{платформа}} + \Delta_{\text{нахил}} + \epsilon, \quad (2)$$

де $\Delta\theta_{\text{заг}}$ – загальна кутова похибка, $\theta_{\text{енкодер}}$ – виміряне значення кута, $\Delta_{\text{платформа}}$ – похибка платформи або вимірювального пристрою, $\Delta_{\text{нахил}}$ – додаткова похибка, спричинена нахилом або перекосом інструменту, ϵ – випадкова похибка ,

Невизначеність результату обчислюється відповідно до GUM [4]:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{еталон}}^2 + u_{\text{позиціонування}}^2 + u_{\text{датчик}}^2 + u_{\text{повторюваність}}^2}. \quad (3)$$

Завдяки інтеграції з LIMS/CAQ-системою (LIMS – цифрова лабораторія, CAQ – цифровий відділ якості), усі вимірювання автоматично зберігаються з цифровим підписом, фіксацією часу, ID приладу та оператора, а також параметрами навколишнього середовища.

У результаті така методика дозволяє: знизити суб'єктивну складову похибки; підвищити повторюваність; виконувати аналіз трендів відхилення та статистичне прогнозування калібрувального інтервалу; створити електронний архів результатів із повною цифровою трасованістю.

Отже, адаптивна методика не лише забезпечує відповідність міжнародним стандартам (ISO 1101, ISO 17025, GUM), а й створює базу для переходу до розумного калібрування в умовах цифрової метрології [3–5].

Література

1. Сидоренко, В. А. Основи метрології та вимірювань : підручник / В. А. Сидоренко. – 2-ге вид. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 312 с.

2. Pritchard, J. *Modern Dimensional Metrology* / J. Pritchard. – London : Springer, 2020. – 198 p. DOI: 10.1007/978-3-030-46780-4.
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – [Чинний]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 42 с.
4. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) : міжнародний документ JCGM 100:2008. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/>.
5. ISO 1101:2017. Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. – Geneva : ISO, 2017. – 36 p.

Гнатенко І.О., Андреев І.В. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧОГО МЕТАЛУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОЛЬФРАМОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

Тверді сплави мають широке промислове застосування. Тип зв'язуючого металу є одним з ключових факторів, що визначають властивості твердих сплавів на основі карбіду вольфраму (WC). Зв'язуючий метал (матриця) надає сплаву необхідну в'язкість, міцність і стійкість до різних видів зносу та деформації. Основними зв'язуючими металами, що використовуються в твердих сплавах на основі WC, є кобальт (Co), нікель (Ni), залізо (Fe) та сплави на їх основі.

Вольфрамокобальтові тверді сплави є одним із найбільш широко використовуваних інструментальних матеріалів у багатьох галузях промисловості. Як альтернативу дорогому Co часто застосовують Ni.

В порівнянні з вольфрамокобальтовими твердими сплавами, сплави WC-Ni мають дещо нижчі механічні властивості, разом з тим мають вищу (в 4 рази) корозійну стійкість [1]. В [2] наводяться дані, що твердість Co ~ на 30% вище твердості Ni (для Co – HV = 8,7 GPa; для Ni – HV = 6 GPa). Ряд дослідників, окрім чистого Ni, прагнуть підвищити механічні властивості застосовують легування добавками карбідів, які затримують ріст частинок WC. Також в літературі наводяться дані, що зв'язка яка містить комбінований склад (80% Co, 20% Ni) в середньозернистому сплаві WC-10% Me не впливає на його твердість, при цьому міцність та

в'язкість руйнування покращуються[3]. Тому наведені дослідження спрямовані на визначення властивостей твердих сплавів з різними металевими зв'язками з метою подальшого їх застосування як інструментальних так і конструкційних матеріалів.

Для досліджень було виготовлено матеріали на основі Co, (Co,Ni), Ni зв'язок, вміст яких становив 6% та 15% за масою в залежності від умов експлуатації цих матеріалів.

В якості вихідних були використані порошкові суміші твердих сплавів WC-Me: WC-6Co, WC-6Ni, WC-15Ni, WC-15Co – серійного виробництва, та виготовлені на їх основі, на власному виробництві спеціальні сплави WC-6(Co, Ni) та WC-15(Co, Ni). Спресовані зразки перед остаточним спіканням піддавалися попередньому спіканню (нормалізації) при температурі 1060 °C у вакуумі. Кінцеве спікання зразків проводили в середовищі вакууму з витримкою 20 хв. При температурі існування рідкої фази.

Температури кінцевого спікання сплавів були 1450 °C та 1350 °C підібрані для кожної марки сплаву [4], щоб забезпечити структуру і властивості відповідно вимогам Державних стандартів. На спечених зразках визначали фізико-механічні характеристики, результати вимірювань зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювання фізико-механічних характеристик досліджуваних спечених твердих сплавів

Сплав	Густина, г/см ³	Твердість, HRA	Твердість, HV 120 кг	Коерцитивна сила, кА/м
WC-6Co	14,9	89,3	13,1	11,0
WC- 6(Co,Ni)	14,5	88,5	12,7	11,9
WC-6 Ni	15,0	87,5	11,1	5,1
WC-15Co	13,8	87,8	9,9	10,5
WC-15(Co,Ni)	14,1	87,0	9,3	12,0
WC-15 Ni	13,8	84	7,7	3,7

В результаті аналізу табл. 1 встановлено, що найнижчі значення твердості та коерцитивної сили мають сплави на Ni зв'язці, що відповідає даним наведеними в літературі [5]. Найвище значення твердості мають сплави на Co зв'язці. Слід зазначити, що найвище значення коерцитивної сили мають сплави на основі комбінованої (Co,Ni) зв'язки. Для підвищення твердості вольфрамових твердих сплавів на Ni зв'язці необхідно додатково застосувати легування карбідами Cr₃C₂, VC, TaC та ін.

Література

1. Aleksandrov Fabijanić, T., Kurtela, M., Škrinjarić, I., Pötschke, J., Mayer, M. Electrochemical Corrosion Resistance of Ni and Co Bonded Near-Nano and Nanostructured Cemented Carbides // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, No. 2. – Article 224. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/met10020224>.
2. Jayaraj, J., Olsson, M. Effect of tribo-layer on the corrosion behavior of WC-Co and WC-Ni cemented carbides in synthetic mine water // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. – 2021. – Vol. 100. – Article 105621. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105621>.
3. Zhang, X.-F., Zhou, J., Liu, C., Li, K., Shen, W.-J., Lin, Z., Li, Z., He, Y., Lin, N. Effects of Ni Addition on Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of Coarse-Grained WC-10(Co, Ni) Cemented Carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – Vol. 83. – P. 123–129. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.01.004>.
4. Бондаренко, В. П., Павлоцкая, Е. Г. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно-контролируемой газовой среде / В. П. Бондаренко, Е. Г. Павлоцкая. – К. : Наукова думка, 1995. – 204 с.
5. Pereira, P., Vilhena, L., Sacramento, J., Senos, A., Malheiros, L., Ramalho, A. Influence of Different Binders and Severe Environmental Conditions on the Tribological and Electrochemical Behaviour of WC-Based Composites // *Lubricants*. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – Article 145. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/lubricants10070145>.

Даниленко Ю.А., Сараєва В.А. Інститут
сцинтиляційних матеріалів НАН України, Харків

ЯК ПРАЦЮВАТИМУТЬ ТК ЗА НОВИМИ ПРАВИЛАМИ: КЛЮЧОВІ ЗМІНИ У ДСТУ 1.14:2024

Діяльність технічних комітетів стандартизації регулюється Законом України «Про стандартизацію» від 5 червня 2014 року № 1315-VII. Згідно зі статтею 15 цього закону, технічний комітет стандартизації (ТК) є формою співробітництва заінтересованих юридичних та фізичних осіб з метою організації і виконання робіт з міжнародної,

регіональної, національної стандартизації у визначених сферах діяльності та за закріпленими об'єктами стандартизації (табл. 1).

Таблиця 1 – Зміст розділів ДСТУ 1.14:2024 зазнав суттєвих змін

Номер розділу та назва	Доповнено або змінено
1	2
8 «основні засади діяльності технічного комітету стандартизації»	доповнено пунктом 8.2 «Управління консенсусом»
10 «Голова технічного комітету стандартизації та заступник голови технічного комітету стандартизації»	голова ТК та заступник голови ТК обирають за пропозицією членів ТК на засіданні ТК голосуванням на трирічний термін
	голова ТК може бути обраний тільки з членів ТК та не може бути уповноваженим представником колективного члена ТК
	наступне подовження терміну виконання обов'язків голови ТК 99 та заступника голови ТК 99 однією і тією самою особою може бути запропоновано членами ТК 99 та заступника голови ТК 99 на строк три роки, але період повноважень не повинен перевищувати дев'ять років
	голова ТК повинен мати: <ul style="list-style-type: none"> • громадянство України; • повну вищу освіту; • комунікативні та управлінські навички; • вміння досягати консенсусу; • досвід роботи у профільній сфері діяльності ТК не менше 5 років; • досвід роботи у сфері стандартизації.
11 Відповідальний секретар технічного комітету стандартизації»	Новообраний голова ТК та/або заступник голови ТК повинні пройти навчання в НОС з питань стандартизації протягом шести місяців з дня призначення його на посаду новообраний відповідальний секретар ТК повинен пройти навчання в НОС з питань стандартизації протягом шести місяців з дня призначення його на посаду

1	2
15 «Процедура голосування»	<p>у процедурі голосування з будь-якого питання щодо діяльності ТК беруть участь тільки колективні члени ТК.</p> <p>голова ТК, заступник голови ТК, відповідальний секретар ТК не мають права голосу .на засіданні ТК</p> <p>індивідуальні члени не беруть участь у голосуванні (за будь яких видів голосування).</p> <p>Індивідуальні члени не беруть участь у засіданні ТК з метою обговорення та надання консультацій</p>
20 Процедура оскарження	описано процедуру оскарження рішень, пов'язаних з діяльністю ТК
22 Порядок роботи національного технічного комітету стандартизації в технічних комітетах міжнародної та регіональної організацій зі стандартизації	Описано порядок участі національних ТК у роботі міжнародних та регіональних організацій зі стандартизації
Додаток К	Кодекс поведінки та етики члена ТК

Основні зміни та їх значення:

Визначено чіткіші критерії для створення та припинення діяльності технічних комітетів основні засади діяльності, що сприятиме більш ефективному управлінню процесами стандартизації.

Новий стандарт передбачає залучення широкого кола зацікавлених сторін, включаючи представників органів влади, бізнесу, наукових установ та громадських організацій, до процесу стандартизації. Це забезпечує більш демократичний та інклюзивний підхід до розробки стандартів.

Оновлені процедури спрямовані на узгодження національної системи стандартизації з міжнародними та європейськими вимогами, що полегшить інтеграцію України до світового ринку та сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної продукції.

Встановлено нові вимоги до організації роботи технічних комітетів, що дозволить оптимізувати процеси розробки та впровадження стандартів, а також забезпечить більш якісне управління діяльністю ТК.

Це надає науковим та освітнім установам можливість активної участі в процесі стандартизації та дозволить враховувати новітні наукові досягнення та інновації при розробці стандартів.

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

КОМПОЗИТИ ІЗ ПОРОШКІВ cBN З ПОКРИТТЯМ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Як відомо, інструменти, оснащені керамоматричними композитами P_cBN групи VL, ефективні в умовах термотрибоактивованого хімічного зношування при швидкісній обробці але руйнуються при ударних навантаженнях. Останнє пов'язано з тим, що механічні властивості VL-композитів (вміст cBN 45–65%) до 2-х разів нижчі у порівнянні з матеріалами групи VH (вміст cBN 70–95%) через зменшену кількість надтвердої компоненти у їхньому складі.

Тому актуальною є вимога збільшення міцності композитів групи VL для використання в інструментах, які працюють з високою швидкістю різання зі змінним припуском та з ударом. Для цього необхідно розробити композит з максимально однорідною дрібнозернистою матричною структурою, в яку занурені зерна cBN.

Тому застосована інкапсуляція зерен порошку cBN до спікання за рахунок створення на цих зернах керамічного покриття, отриманого шляхом йодо-транспортної реакції з осадженням Ti. Вміст Ti у покриттях становив 3, 5 та 8% від маси порошку.

З порошків із покриттям в АВТ «Тороїд-20» отримано спеки P_cBN, з яких виготовлено різальні пластини RNMN 070300.

Структури P_cBN досить гомогенні, зерна надтвердої фази інкапсульовані в керамічну матрицю товщиною до 1 мкм на міжзерених границях та 5–8 мкм в зоні потрійних й четверних стиків. Загалом керамічні включення не перевищують середнього розміру зерна cBN для зразків з 3 та 5% Ti. Керамічна матриця – це щільна структура з субмі-

кронних зерен TiN та TiB₂. Інтенсивні рентгенівські піки відповідають високому вмісту Ti в міжзерених прошарках, розподіл Ti по площі шліфа повторює форму матричної структури.

Максимальна мікротвердість, характерна для PcBN з 3% Ti, 40 ГПа. Зразки з 5 та 8% мають меншу твердість – 30–32 ГПа. Для порівняння, мікротвердість композиту марки Борсиніт, який за складом близький до ВН групи (97% вмісту cBN), – 45 ГПа.

Дослідження кінетики зношування інструментів, оснащених створеними композитами, при точінні загартованої сталі ХВГ показали, що в діапазоні середніх швидкостей різання, де суттєвий вплив має абразивна взаємодія в зоні різання, перевагу має інструмент із PcBN Борсиніт. При високошвидкісній обробці інтенсивність зношування менша навіть у експериментального інструменту, більш стійкого до взаємодії в зоні різання, обумовленої хімічними факторами – при чистовому точінні інструменти мають показники ефективності близькі до інструментів, оснащених композитом ВЛ групи з вмістом TiN 25%.

Тестування в умовах швидкісного різання з імпульсним ударним навантаженням показало, що інструменти із експериментальними зразками PcBN зберігають працездатність. Найкращу працездатність має композит з 3% Ti. Для інструментів із композитів з більшим вмістом Ti після 2 хв різання характерна поява мікрОВикришування різальної кромки. Водночас, інструменти, оснащені композитом ВЛ групи, руйнуються, а у оснащених композитом Борсиніт спостерігається інтенсивне початкове зношування різальної кромки.

Для поясненого отриманих результатів розроблена модель, що враховує вплив мікроструктури композиту на напружений стан, пружні модулі та крихку міцність двофазної кераміки при розв'язання задачі пружної деформації представницького обсягу матеріалу із застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ). Розрахунки пружних констант композитів в залежності від об'ємного вмісту фаз cBN та TiN свідчать, що ефективна пружність двокомпонентної кераміки визначається, насамперед, об'ємним вмістом складових, тоді як вплив типу структури є мінімальним.

Поле напружень у структурі з покриттям є набагато одноріднішим з максимальними значеннями напружень на 40% нижчими, ніж в кераміці групи ВЛ. При цьому максимальні деформації в кераміці з покриттям є меншими на 30%. Емпірична інтегральна функція розподілу 1-го головного напруження у фазах композитів може бути з високою точністю апроксимована функцією Вейбулла, що дає змогу оцінювати

крихку міцність поліфазних композитів на основі статистичної теорії екстремальних значень.

Оцінка ймовірності руйнування крихкого матеріалу по Вейбуллу у випадку аналізу напруженого стану, розрахованого МСЕ, дозволила встановити, що міцність двокомпонентної кераміки визначається переважно крихкою фазою, а оцінка міцності композитів з покриттям показує, що міцність такого матеріалу вище.

Загалом можна очікувати підвищення крихкої міцності створеного РсВN на 25–30% у порівнянні з композитами ВL групи.

Таким чином, отримані РсВN, близькі за хімічним складом композитів ВL групи, і за рахунок керованого створення матричної структури є ефективними для використання у різальних інструментах, які під час обробки загартованої сталі працюють при високих швидкостях різання. А висока міцність створених РсВN дозволяє оснащати ними інструменти для експлуатації при напівчистовому різанні за наявності ударних навантажень.

*Клименко С.А., Манохін А.С., Чумак А.О.,
Клименко С.А., Мельничук Ю.О.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Zhang Hao, Stelmakh O.U. Beijing Institute of Technology,
Beijing, China

ЗНОС ІНСТРУМЕНТУ З РсВN ПРИ ТОЧІННІ СТАЛЕЙ ВИСОКОЇ ТВЕРДОСТІ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Одним із пріоритетних напрямків удосконалення технологічних процесів в машинобудуванні є підвищення продуктивності механічної обробки, що дозволяє знизити собівартість виготовлення деталей і підвищити конкурентоспроможність виробів. Особливої актуальності таке питання набуває при обробці виробів із сталей високої твердості в умовах динамічного навантаження на різальний інструмент, оснащений надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору (РсВN). Одним із шляхів підвищення працездатності лезового інструменту при такій обробці є надання йому геометричних параметрів, що дозволять забезпечити високу стійкість при роботі із високопродуктивними режимами різання.

На першому етапі досліджуваних вивчалися особливості зношування інструменту, оснащеного круглою пластиною з РсВН Борсиніт, з геометричними параметрами $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ при точінні заготовки із загартованої сталі ШХ15 (62 HRC), яка мала повздовжний паз шириною 10 мм. Обробку проводили з наступними режимами різання: $v = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм. В такому випадку зношування інструменту на основі РсВН відбувається переважно по задній поверхні і визначається інтенсивністю протікання процесів абразивної та адгезійної взаємодії на контактних ділянках.

Вже після 2 хв роботи спостерігався інтенсивний знос інструменту по задній поверхні, зміна геометрії різальної кромки, що погіршує якість обробленої поверхні. Величина зносу по задній поверхні досягла $h_3 = 0,16$ мм. При продовженні роботи протягом 4 та 6 хв інтенсивність зношування інструменту знижується, проте поступово збільшуються розміри контактних ділянок, що призводить до зростання сили та температури різання. Величина зносу по задній поверхні зростає до $h_3 = 0,25$ мм. Поступово починають з'являтися вібрації та значно погіршується якість обробленої поверхні. Проводити подальшу обробку таким інструментом є недоцільним внаслідок збільшення ймовірності його сколювання.

За аналогічних умов проведено дослідження кінетики зношування інструменту, який працює за косокутною схемою різання (кут нахилу різальної кромки $\lambda = 50^\circ$). Після 4 хв точіння величина зносу по задній поверхні інструменту не перевищувала $h_3 = 0,03$ мм, не спостерігається суттєвого руйнування різальної крайки та викришувань інструментального матеріалу. При роботі протягом 8 хв мало місце поступове рівномірне зношування інструменту без формування суттєвих слідів руйнування.

Це свідчить про високу стійкість інструменту, що працює за косокутною схемою, при обробці з динамічними навантаженнями.

Для оптимізації геометричних параметрів інструменту при косокутному точінні проведені дослідження із різними кутами нахилу різальної кромки:

- при обробці інструментом із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 30^\circ$ вже на перших хвиликах роботи спостерігається формування фаски зносу по задній поверхні із величиною $h_3 = 0,10\text{--}0,12$ мм;
- при збільшенні кута нахилу різальної кромки до $\lambda = 40^\circ$ упродовж майже 5 хв роботи слідів зношування на контактних ділянках як по

передній, так і по задній поверхнях інструменту, практично не спостерігається;

- при обробці інструментом із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 50^\circ$ протягом 3 хв на задній поверхні інструменту формується фаска зносу із величиною до 0,03 мм, а після 6 хв роботи на контактних поверхнях інструменту формуються невеликі зазубрини, зростання яких у подальшому може призвести до погіршення якості обробленої поверхні.

Враховучи, що швидкість зношування інструменту із кутом нахилу різальної кромки до $\lambda = 50^\circ$ становить 5,8 мкм/хв, стійкість інструменту при досягненні фаски зносу по задній поверхні $h_3 = 0,30$ мм може дорівнювати 40–50 хв.

Збільшення величини подачі до $S = 0,19$ мм/об при роботі стандартним інструментом призводить до інтенсифікації процесів зношування та руйнування його вершини. Це пов'язано із зростанням сили різання та збільшенням динамічного навантаження на контактні ділянки інструменту. Після 30 с роботи спостерігалось сколювання різальної кромки та вихід інструменту з ладу.

Збільшення подачі до $S = 0,38$ мм/об при точінні інструментами із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 40\text{--}50^\circ$ не призводить до суттєвого зростання інтенсивності зношування інструменту. Після 3 хв роботи на контактних ділянках інструменту не спостерігається викришування інструментального матеріалу, а різальна кромка залишається рівною.

Збільшенні подачі до $S = 0,67$ мм/об при використанні інструменту із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 40^\circ$ не призводить до катастрофічного руйнування різця, що дозволяє виконувати чорнову обробку.

Із зростанням швидкості різання при обробці з ударом до 200 м/хв інтенсивність зношування інструменту із РсВN знижується:

- на перших хвилинах роботи не відбувається інтенсивне руйнування різальної вершини інструмента;
- після 1,5 хв роботи знос по задній поверхні інструменту становить $h_3 = 0,10$ мм.

У подальшому спостерігається повільне збільшення контактних ділянок інструменту із формуванням певного кратера вздовж різальної кромки. Після 6 хв роботи знос по задній поверхні інструменту становить $h_3 = 0,14$ мм, а інструмент зберігає свою працездатність.

Проведені дослідження довели, що при обробці сталей високої твердості інструментами, оснащеними РсВN, в умовах динамічного навантаженнями ефективним є застосування косокутної схеми різання.

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

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ (ОГЛЯД)

Чавун є універсальним та ефективним матеріалом, який широко використовується в різних галузях промисловості в різноманітних продуктах, охоплюючи як технічне, так і нетехнічне застосування. Такі властивості, як вища міцність та в'язкість руйнування в поєднанні з нижчою теплопровідністю, роблять високоміцні чавуни (CGI) важчим для обробки в порівнянні із сірими чавунами. Оброблюваність чавуну в основному визначається формою, кількістю та розподілом графіту в поєднанні з мікроструктурою матриці, легуючими елементами та включеннями [1].

Як правило, оброблюваність чавунів знижується, коли форма графіту змінюється від лускоподібного до ущільненого та нудулярного графіту. Загалом наявність нудулярного графіту негативно впливає на оброблюваність високоміцного чавуну CGI, як при безперервному, так і при переривчастому різанні, оскільки нудулярність підвищує твердість і міцність на розрив. Збільшення вмісту нудулярного графіту від 5 до 50% зменшує на 40% зносостійкість інструменту із ПКНБ при точінні CGI зі швидкістю 800 м/хв [2]. Згідно з дослідженнями, проведеними в [32], збільшення нодулярності сильно впливає на знос інструменту при точінні на помірних і високих швидкостях різання (300 і 400 м/хв, відповідно), але не на нижчих швидкостях різання (200 м/хв). Крім того, результати вказують на те, що невелика різниця у нодулярності від 5 до 20% має більш значний вплив на зношування інструменту, ніж від 20 до 62%, ймовірно, через більшу різницю в межі міцності на розрив в діапазоні від 5–20% порівняно зі збільшенням від 20–62%.

Однією з причин високої стійкості різальних інструментів при обробці сірого чавуну є утворення захисного шару сульфіду марганцю на інструменті під час безперервного різання. У сірому чавуні сірка реагує з марганцем, утворюючи включення сульфіду марганцю (MnS). Включення MnS гнучкі та м'які, вони, як правило, діють як тверде мастило, крім того, вони здатні створювати захисний шар на контактних поверхнях інструменту. Однак у високоміцному чавуні CGI утворення захисного шару MnS не відбувається, що пов'язано з процесом десу-

льфурації до надзвичайно низьких рівнів ($< 0,02\%$) необхідних для виробництва високоміцних чавунів CGI та SGI [2], оскільки збільшення вмісту сірки сприяє зниженню міцності на розрив. Десульфуризація зазвичай досягається шляхом додавання магнію або кальцію в розплав. Mg і Ca мають більшу хімічну спорідненість із сіркою, ніж Mn, тому сірка переважно реагує з ними, утворюючи CaS або MgS (видаляються з розплаву у вигляді шлаку). Цей процес знижує кінцевий рівень сірки в ковші, перешкоджаючи утворенню включень MnS в кінцевих продуктах лиття [2]. На рис. 1 показано, що зменшення вмісту сірки з $0,08\%$ (стандартний рівень) до $0,015\%$ призводить до зменшення терміну служби інструменту на 50% .

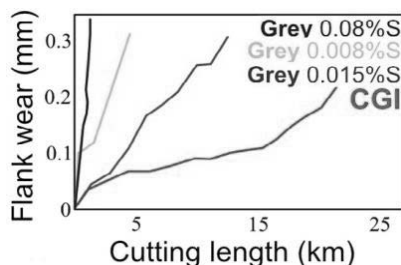


Рис. 1 – Вплив вмісту сірки в сірому чавуні на знос інструменту із ПКНБ (50% cBN + TiC) в порівнянні з високоміцним чавуном CGI [2]

В роботі [4] стверджують, що наявність шару MnS не є причиною підвищення стійкості інструментів із ПКНБ при обробці як сірих та і високоміцних чавунів. Головною причиною, на думку авторів, є те що вказані з'єднання осідають поза контактною зоною різання, а не на різальній кромці де відбувається максимальний рівень зношування інструменту. Таким чином, шар MnS може забезпечити змащувальну здатність, але не захистити від зношування.

Автори в [4] стверджують, що композити із ПКНБ, які мають зв'язуюче на основі Al (CB7205 і BN250) здатні утворювати на контактних ділянках різання з'єднання Al_2O_3 . Частинки Al_2O_3 , як частина сполучної фази деформувалися під дією інтенсивного зсувного навантаження та високої температури, утворюючи стійкий до розчинення шар, що покриває до 25% площі ділянки зносу по передній поверхні, причому по задній поверхні інструменту формування шару Al_2O_3 не зафіксовано.

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок, що в складі високоміцних чавунів не міститься значна кількість сірки (S) $\leq 0,02\%$

та марганцю (Mn) 0,1–0,4% здатних утворювати з'єднання MnS, яке виступає в ролі твердого змащення в зоні різання, в порівнянні із сірим чавуном.

Одним з шляхів підвищення стійкості та продуктивності обробки CGI є створення в контактній зоні різання змащувального шару. Формування такого шару можливе за рахунок створення композитів, в тому числі на основі КНБ, які будуть містити у своєму складі високотемпературні з'єднання із ефектом твердого змащення. Перспективними добавками є з'єднання MnS, WS₂, MoS₂, h-BN, Al₂O₃ у кількостях 1–5 мас.% без сильного зниження міцності різальних композитів.

Література

1. Machining of Compacted Graphite Iron: A review / L. J. Sirtuli et al. Journal of Materials Processing Technology. 2024. P. 118553.

2. S. Dawson, I. Hollinger, M. Robbins, J. Daeth, U. Reuter, H. Schulz, The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron, in: SAE Technical Papers, 2001.

3. Investigation of tool wear mechanisms in CGI machining / G. Grenmyr et al. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2011. Vol. 4, no. 1. P. 3.

4. Formation mechanism of alumina layer in protecting cubic boron nitride inserts in turning cast irons / D. Nguyen et al. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2020. Vol. 153. P. 103539.

Комарова Г.Л., Хаїнський Є.В. Український державний університет залізничного транспорту
Лалазарова Н.О. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

ІНЖЕНЕРІЯ ЯКОСТІ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

У контексті сучасного технічного прогресу та зростаючих екологічних вимог актуальним напрямом підвищення якості та довговічності металевих деталей транспортного призначення є впровадження екологічно безпечних, енергоефективних технологій обробки поверхні. Однією з таких технологій є пареооксидавання – термохі-

мічний метод насичення металевих поверхонь оксидами заліза за рахунок обробки перегрітим водяним паром. Її екологічність, економічність і технологічна гнучкість дають змогу створювати високоєфективні оксидні покриття з керованими фізико-механічними властивостями. Особливої уваги заслуговують дослідження впливу електричного поля на процес формування оксидної плівки під час парооксидування, що дозволяє регулювати фазовий склад покриття.

Проведені експериментальні дослідження з парооксидування сталі 20 за різних температурних режимів (450 °C і 600 °C) з використанням і без використання електричного поля напруженістю $2 \cdot 10^6$ В/м дозволили встановити вплив температури та електричного поля на фазовий склад захисної плівки. Результати рентгенофазового аналізу оксидних плівок наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Фазовий склад оксидної плівки, отриманої парооксидуванням сталі 20 (%)

Температура, °C	Електричне поле	Гематит (Fe ₂ O ₃)	Магнетит (Fe ₃ O ₄)	Вюстит (FeO)
450	відсутнє	15 %	85 %	–
	присутнє			–
600	відсутнє	10 %	55 %	35 %
	присутнє	12 %	56 %	32 %

Як видно з табл. 1, при підвищенні температури до 600 °C у структурі плівки з'являється вюстит (FeO), а кількість магнетиту (Fe₃O₄) зменшується. Вплив електричного поля виявляється більш відчутним при нижчих температурах, де воно стимулює активне перенесення іонів кисню, підвищуючи вміст гематиту. Це підтверджується також результатами аналізу дифрактограм (рис. 1), які візуалізують динаміку зміни фазового складу залежно від параметрів обробки

Нааявність гематиту забезпечує високу хімічну стійкість покриття, тоді як магнетит підвищує його зносостійкість. Можливість регулювання співвідношення фаз завдяки електричному полю дозволяє оптимізувати структуру покриття для досягнення необхідних триботехнічних властивостей у транспортному машинобудуванні. За умов зменшення температури електричне поле відіграє ключову роль у керуванні процесами оксидзації завдяки зростанню інтенсивності міграції кисневих іонів.

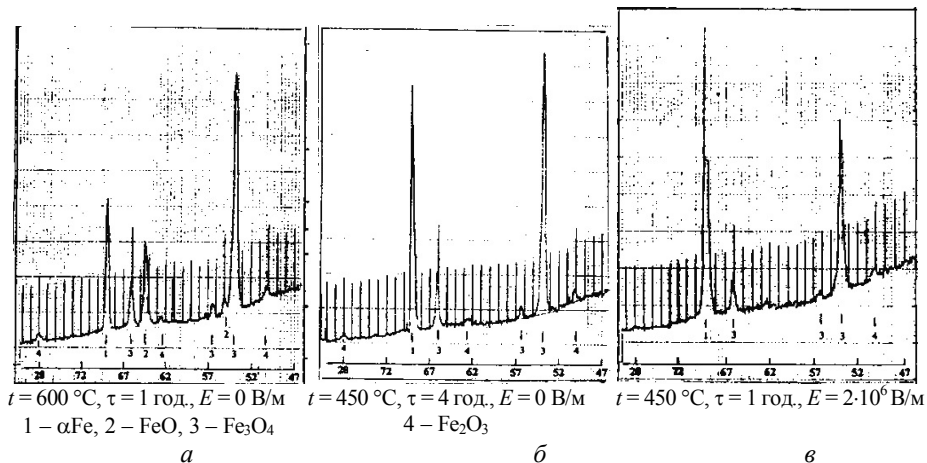


Рис. 1 – Дифрактограми захисних покриттів

Таким чином, застосування електричного поля дозволяє зберегти якісний фазовий склад, характерний для високотемпературного режиму, за умов зниження температури процесу, що значно підвищує енергоефективність.

Фізико-хімічний механізм дії електричного поля пов'язаний з посиленням міграції іонів кисню до поверхні металу, що сприяє зміні фазової рівноваги в системі Fe–O та керованому формуванню товщини і складу оксидної плівки. Це підтверджено результатами рентгеноструктурного аналізу та сканувальної електронної мікроскопії, які засвідчили сталість фази гематиту при зміні параметрів обробки та виявили зростання щільності й однорідності плівки.

З метою метрологічного забезпечення процесу парооксидування необхідним є постійний контроль температури, вологості, напруженості електричного поля та часу експозиції, а також застосування сертифікованих методів неруйнівного контролю для оцінки структури та товщини покриттів. Визначення параметрів якості, таких як адгезія, твердість, зносостійкість та корозійна стійкість, дозволяє класифікувати отримані покриття відповідно до міжнародних стандартів, зокрема ISO 9227.

Запропонований підхід створює нові можливості для застосування парооксидування в транспортному машинобудуванні, зокрема для виготовлення чи ремонту деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень та агресивного середовища — колісних пар, гальмівних дисків, корпусів редукторів, рам та елементів кріплення.

Отже, поєднання термохімічного насичення паром із впливом електричного поля є перспективним напрямом підвищення експлуатаційної надійності транспортних виробів при одночасному зниженні температури та екологічного навантаження, що відповідає принципам сталого розвитку та ресурсозбереження.

Література

1. Комарова, Г. Вплив феримагнітного резонансу на перетворення мікрохвильової енергії системою, що складається з двох циліндрів в механічну / Г. Комарова // Радіотехніка. – 2023. – № 1(212). – С. 102–114.
2. ДСТУ EN ISO 9227:2022. Випробування на корозію в штучній атмосфері. Випробування сольовим туманом (EN ISO 9227:2017, IDT; ISO 9227:2017, IDT) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/searchdoc.html?request=ISO+9227&langbs=ua>.
3. Комарова, Г. Л., Светош, В. Ю. Підвищення якості деталей машин сучасними методами нанесення покриттів / Г. Л. Комарова, В. Ю. Светош // 4-та міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», 27–28 листопада 2023 р. : тези доповідей. – Харків : УкрДУЗТ, 2023. – С. 314–316.

Кузін О.А., Копилов В.І., Петренко В.В. 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

ПІДВИЩЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕТАЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ І ЗВАРЮВАННІ

Для виготовлення залізничних конструкцій широко використовують сталі з обмеженою і важкою зварюваністю, що містять понад 0,45% вуглецю і є схильними до утворення тріщин при ремонтах та експлуатації виробів.

Оптимізація процесів технологічної обробки деталей вимагає встановлення зв'язку між кількісними параметрами структурно-енер-

гетичного стану поверхонь поділу і їх поведінкою в умовах зовнішніх навантажень.

Аналіз характеристик механічних властивостей граничних зон поділу з врахуванням їх енергії проводили при дослідженнях сталей 40Х, 40ХГ, 40ХГР, 40ХС, 60С2, 60С2ХА, вагонних коліс після наплавлення гребенів, нероз'ємних з'єднань рейок Р65, що отримані при термітному зварюванні.

Формування пошкоджень при дії циклічних навантажень включає етапи утворення мікроструктурно і фізично коротких тріщин, а також довгих тріщин [1]. В умовах експлуатації деталей рухомого складу ці етапи реалізуються. Міжзеренні пошкодження переважно виникають в локальних зонах, енергія яких наближається до поверхневої. Дослідження показали, що такими зонами є поверхні поділу, які розміщені між потрійними стиками з наявністю гострих і тупих кутів [2]. Тому площу таких поверхонь поділу вводили в ієрархічні моделі, які описують вплив полікристалічної структури на контактну довговічність сталі. Встановлено, що збільшення зношування відбувається при тих значеннях матричного параметра, який отримується внаслідок формування в структурі сталей потрійних стиків, що утворені поверхнями поділу енергія яких суттєво відрізняється. Опір утворенню міжзеренних пошкоджень зменшується при зростанні частки поверхонь поділу зерен з високим рівнем енергії. Отримані закономірності були підтверджені дослідженнями сталей, які леговані нікелем, молібденом і кремнієм. На основі аналізу експериментальних характеристик локальних об'ємів зерен розроблено критерій схильності сталей до міжзеренного руйнування. У відповідності з кількісними параметрами градієнта зміни мікротвердості поблизу внутрішніх поверхонь поділу полікристалічні матеріали мають низьку, стабільну і катастрофічну схильність до міжзеренного руйнування [3].

Дослідження суцільнокатаних вагонних коліс після наплавлення гребенів показали підвищення опору руйнуванню при контактних навантаженнях за рахунок зменшення зон сплавлення валків, площі поверхонь поділу зерен з високим рівнем енергії у феритних ділянках.

Поява поперечних тріщин в нероз'ємних з'єднаннях рейок після термітного зварювання обумовлена формуванням в них ділянок фериту розміром понад 210 мкм. Аналіз кутів між поверхнями поділу в потрійних стиках виявив зростання площі поверхонь поділу зерен фериту з більшою величиною енергії, які здатні до утворення міжзеренних пошкоджень, поширення поперечних тріщин після термітного зварювання. Рекомендації по підвищенню опору поверхонь поділу до утво-

рення тріщин, що розвиваються за міжзеренним механізмом представлені на рис. 1.

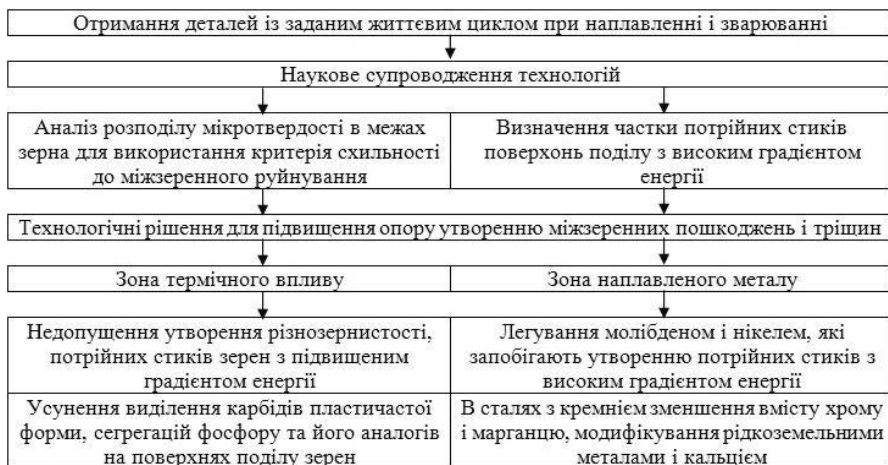


Рис. 1 – Підвищення опору до утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин в сталях з обмеженою і важкою зварюваністю, що використовуються при виготовленні залізних конструкцій

Висновки. При підвищенні однорідності розподілу поверхонь поділу зерен за енергіями ефективно зростає опір утворенню міжзеренних пошкоджень, стійкість до руйнування при контактній взаємодії наплавленого металу. Управління параметрами поверхонь поділу дає можливість запобігти утворенню дефектів при зварюванні і експлуатації деталей.

Література

1. Трошенко, В. Т. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия / В. Т. Трошенко, Г. В. Цыбанев, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов. – К. : ИПП НАН Украины, 2009. – 661 с.
2. Kuzin, O. Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure / O. Kuzin, B. Lukiyanyets, N. Kuzin // Технологический аудит и резервы производства. – 2019. – № 1/1 (45). – С. 25–30.
3. 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 Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 5/12 (101). – P. 14–22.

НАНОІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ НА ТРАНСПОРТІ

Наноінженерія поверхні деталей тертя є ключовим напрямком для підвищення ефективності, надійності та екологічності транспортних і промислових механізмів, це технологія модифікації мікроструктури та складу поверхневого шару деталей тертя на нанорівні для покращення їх експлуатаційних характеристик. Формування наноструктурованих покриттів дозволяє знизити коефіцієнт тертя, підвищити твердість і зносостійкість деталей.

Основні аспекти впливу наноінженерії на зносостійкість деталей тертя:

- формування наноструктурованих покриттів (наприклад, TiN, DLC, Al₂O₃) створюють бар'єрний шар, що зменшує контактне тертя та запобігає зносу. Наночастинки підвищують твердість поверхні, що зменшує пластичну деформацію та мікрорізання матеріалу;
- зменшення коефіцієнта тертя між деталями, зменшуючи енергетичні втрати в механізмах за рахунок вуглецевих нанотрубок та графенових покриттів, а самозмащувальні наноматеріали (MoS₂, WS₂) зменшують сухе тертя та зношування в умовах високих температур і навантажень дозволяють створювати надлегкі, але міцні конструкції транспортних засобів;
- поліпшення термічної стабільності так як наноструктуровані покриття можуть витримувати екстремальні температури, що критично важливо для деталей двигунів і турбін. Висока термостійкість матеріалу запобігає окисленню та термічній деградації поверхні;
- оптимізація мікроструктури поверхні забезпечує зменшення мікронерівностей за допомогою наномодифікації знижує концентрації напружень, що зменшує ризик утворення тріщин і передчасне руйнування деталей. Контрольована наношорсткість сприяє рівномірному розподілу навантаження по поверхні контакту;
- регенеративні та самовідновлювані покриття такі як наноплівки, що містять адаптивні частинки, можуть відновлювати мікропошкодження в процесі експлуатації, значно подовжуючи строк служби деталей. Використання нанофлюїдів з функціональними добавками дозволяє формувати захисний шар під час тертя.

Застосування нанотехнологій у транспортній інженерії дозволяє оптимізувати роботу поверхонь поршнів, клапанів, підшипників для зменшення тертя та покращення теплопровідності. Використання нанокомпозитного покриття на основі металів і кераміки (TiN, DLC, Al₂O₃) зменшує знос деталей двигуна та коробки передач. Фізико-хімічні методи (іонне напилення, лазерна обробка, плазмове осадження) та хіміко-термічні методи (азотування, карбонізація, борування на нанорівні) поліпшують зносостійкість деталей тертя в машинобудуванні і на транспорті.

Впровадження нанотехнологій у транспортну інженерію та машинобудування має значний потенціал для підвищення паливної ефективності та зменшення негативного впливу на довкілля. Це досягається завдяки покращенню трибологічних характеристик деталей, зниженню маси конструкцій, підвищенню ефективності згоряння палива та зменшенню викидів шкідливих речовин. Нанопокриття та наноструктуровані мастильні матеріали суттєво знижують коефіцієнт тертя, що зменшує механічні втрати енергії. Використання нанододатків у мастильних матеріалах (оксиди металів, наночастки дисульфиду молібдену MoS₂) покращує їхні антифрикційні властивості та зменшує втрати енергії. Оптимізація трибологічних характеристик дозволяє зменшити зношення деталей, що сприяє збереженню їхньої ефективності протягом усього терміну служби.

Нанокаталізатори покращують процес горіння палива, підвищуючи його ефективність та зменшуючи утворення токсичних викидів. Використання наночастинок металів (CeO₂, Pt, Pd) у складі пального сприяє кращому розпиленню та повнішому згорянню пального, що підвищує енергоефективність двигуна, а оптимізоване горіння зменшує утворення нагару на деталях двигуна, що знижує потребу в технічному обслуговуванні та покращує довговічність агрегатів. Самовідновлювані нанопокриття дозволяють ремонтувати мікропошкодження без потреби в частих замінах деталей.

Використання нанофільтрів для уловлювання твердих частинок та токсичних газів у вихлопних системах дозволяє значно знизити рівень шкідливих викидів. Каталітичні нейтралізатори на основі наночастинок благородних металів (Pt, Rh, Pd) ефективніше нейтралізують NO_x, CO та незгорілі вуглеводні. Наноматеріали можуть використовуватися для очищення вихлопних газів від сажі та оксидів азоту, що особливо актуально для дизельних двигунів.

Нанотехнології відіграють важливу роль у підвищенні паливної ефективності та екологічності транспортних засобів. Вони дозволяють зменшити втрати енергії на тертя, покращити процес горіння пального

го, зменшити викиди шкідливих речовин та підвищити довговічність деталей. Впровадження наноматеріалів у транспортну галузь сприяє розвитку екологічно чистих та енергоефективних технологій майбутнього. Інтеграція технологій 3D-друку з нанопокриттями слугують для створення високоефективних деталей.

Література

1. Нанохімія і наноматеріали [Електронний ресурс] : підручник для здобувачів ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад. Т. А. Донцова, М. І. Літинська, Ю. М. Феденко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 170 с.
2. Павловський, Ю. В. Сучасні матеріали в техніці: наноматеріали та нанотехнології : навчально-методичний посібник / Ю. В. Павловський, В. Д. Попович. – Дрогобич : Дрогобицький державний педагогічний університет імені І. Франка, 2024. – 76 с.
3. Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування : тези доповідей XI конференції молодих вчених та спеціалістів, м. Київ, 2020 р. – Київ : ІНМ НАНУ, 2020.

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

ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗУ

В машинобудуванні при масовому виробництві деталей машин все більшого поширення набуває прецизійне врізне шліфування, яке за допомогою правлячих роликів забезпечує високопродуктивну і якісну обробку деталей складної форми, в тому числі з важкооброблюваних матеріалів, високу точність і стабільність якості оброблюваних виробів. Зарубіжними та вітчизняними дослідниками накопичено чималий досвід конструювання і виготовлення правлячих роликів, які оснащені шліфпорошками синтетичного алмазу. В даний час у результаті вдосконалення процесу синтезу деякими із провідних зарубіжних фірм отримані кристали алмазів з дуже високою міцністю, з яких можуть

бути виготовлені високоміцні шліфпорошки синтетичного алмазу марок АС40 – АС200.

При вирощуванні кристалів алмазу у різних ростових середовищах в залежності від умов зростання та після їх вилучення, обробки, сортування утворюються кристали з різним ступенем дефектності з поверхнею граней від атомно-гладких до дефектних. Як правило, дефекти поверхні кристалів алмазу мають підвищену хімічну активність і впливають на характеристики міцності кристала, тому важливо дослідити та проаналізувати вплив дефектів поверхні високоміцних шліфпорошків алмазу на зміну їх поверхневих властивостей. Тому метою даної роботи є дослідження фізико-механічних та фізико-хімічних характеристик високоміцних синтетичних шліфпорошків алмазу марок АС300–АС200 зернистостей 630/500 і 500/400.

Дослідження проводили на шліфпорошках алмазу марок АС300, АС250, АС200 зернистості 630/500 та марки АС250 зернистості 500/400. Для кожної окремої зернистості визначали фізико-механічні характеристики: міцність, як показник міцності при статичному стисненні (Р, Н); методом Фарадея оцінювали питому магнітну сприйнятливості χ (м³/кг). За величиною вільної енергії насичення водою 1г порошку оцінювали гідрофільність (ΔC_s , Дж/моль·г). Дослідження поверхні порошків алмазу проводили класичним методом адсорбції газів при низьких температурах відповідно до принципу БЕТ за допомогою газоадсорбційного аналізатора NOVA 2200 (Quantachrome, USA) і Accusorb 2100 (Культронікс), які призначені для вимірювання пористості, питомої площі поверхні, радіусу пор та ін. Принцип дії – статичний манометричний метод. Результати вимірювання приведені у табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики шліфпорошків алмазу марок АС300-АС200 зернистостей 630/500 і 500/400 (ТУ У 28.5-0541177377-072-2003)

Марка шліфпорошків алмазу	Найменування показників		
	середній діаметр частинки, $d_{сер}$, мкм	міцність, Н	питома магнітна сприйнятливості $\chi_s \times 10^8$ м ³ /кг
630/500			
АС300	565	750	3,3
АС250		590	3,8
АС200		510	8,8
500/400			
АС250	470	395	2,5

Як впливає з табл. 1, шліфпорошки алмазу зернистостей 630/500 і 500/400 за міцністю розрізняються відповідно діапазону марок АС300–АС200 зернистостей 530/500 та 500/400 за ТУ У 28.5-0541177377-072-2003. Питома магнітна сприйнятливості шліфпорошків алмазу зернистості 630/500 марок АС300 та АС200 завдяки різній кількості включень та домішок в кристалах алмазу відрізняється між собою у 2,7 разів.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні характеристики шліфпорошків алмазу марок АС300-АС200 зернистостей 630/500 і 500/400 (ТУ У 28.5-0541177377-072-2003)

Марка шліфпорошків алмазу	Найменування показників			
	гідрофільність, ΔC_s , Дж/моль·Г	питома площа поверхня $S_{\text{БЕТ}}$, м ² /Г	об'єм пор, V , мл/Г	середній радіус пор, R , Å
630/500				
АС300	0,1960	0,17	$1,88 \times 10^{-4}$	21,1
АС250	0,4848	0,20	$1,99 \times 10^{-4}$	18,7
АС200	0,5231	0,21	$1,98 \times 10^{-4}$	20,0
500/400				
АС250	0,3825	0,18	$1,75 \times 10^{-4}$	19,3

За результатами таблиці впливає, що величина гідрофільності поверхні досліджених зразків шліфпорошків алмазу марок АС300–АС200 зернистості 630/500 для кристалів алмазу з більш атомно-гладкою поверхнею і з більшою міцністю марки АС300 нижче ніж для алмазів марки АС250 у 2,5 рази, а для алмазів марки АС200 у 2,7 рази. З зменшенням середнього розміру зерен для алмазів марки АС250 тобто зменшенням їх зернистості, їхня величина гідрофільності поверхні також зменшується приблизно у 1,3 рази.

Досліджені шліфпорошки синтетичного алмазу марки АС300, АС250 і АС200 зернистостей 630/500 та 500/400 характеризуються невеликою питомою поверхнею 0,17–0,21 м²/г і малим об'ємом пор $(1,75–1,99) \times 10^{-4}$ мл/г що узгоджується з їхньою будовою. Досліджені зразки не містять мікропори, що пояснює малі значення їхньої питомої поверхні. Деякі відмінності в структурно-сорбційних параметрах досліджених шліфпорошків синтетичного алмазу імовірно пов'язані з різною будовою поверхневого шару і наявності незначної кількості включень та домішок.

*Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Полторацький В.Г.,
Петасюк Г.А., Ситник Б.В.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,
Солод В.Ю., Музичка В.А. Дніпровський державний
технічний університет МОН України, Кам'янське,

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В НАПРЯМКУ ЗАСТОСУВАННЯ КАРБІДНИХ ПОКРИТТІВ НА АЛМАЗНИХ ЗЕРНАХ

Експлуатаційні характеристики алмазного шліфувального інструменту у значній мірі залежать від характеристик алмазів, що застосовуються для його виготовлення. Покрыття зерен алмазів є одним з важливих факторів впливу на зміну його властивостей та підвищення утримання у зв'язуючому робочого шару шліфувального круга. Свого часу [1] нами зверталася увага на багатокомпонентні покриття на основі сумішей із оксидами і карбідами. В даному повідомленні нами зупинена увага на найсучасніших (2024 року) публікаціях, пов'язаних із новітніми розробками у напрямку застосування карбідів, як покриття.

Застосування алмазів, покритих нікелем (Ni), є широко поширеним підходом до підвищення ефективності процесу гальванічного покриття алмазів у композитах, що застосовується при виробництві канатних пил. Але чистий алмаз не вступає в хімічну реакцію з нікелем, а міцність міжфазного зв'язку між нікелевим покриттям і алмазом є відносно слабкою. Це часто призводить до відділення алмазів від нікелевого покриття в процесі різки. Щоби вирішити цю проблему, при виготовленні канатних пил застосовувалися алмази з титановим (Ti) покриттям. В статті [2] розроблена технологія вакуумного повільного випаровування для отримання алмазного мікропорошка (8 мкм) з рівномірними провідними покриттями Ti, щільно зв'язаними з алмазом через міжфазний продукт TiC. Алмазний мікропорошок з Ti-покриттям був повністю покритий гальванічним шаром Ni, а TiC, що утворювався між Ti-покриттям і алмазом, за безпечував більшу силу міжфазного зчеплення у порівнянні з силою алмазного мікропорошку з Ni-покриттям (рис. 1). Було виявлено, що після різки алмаз з титановим покриттям не втрачався с канатної пили. Тобто, саме утворення карбіду титану і сприяє кращому закріпленню алмазного шліфпорошку.

На відміну від попередньої статті, в статті [3] Ti-покриття, приготвлені при різних тисках, наносилися на частинки алмаза методом магнетронного розпилення. Результати показали, що мікроструктура Ti-покриттів залежить від тиску осадження. Всі поверхні покриттів

мали зернисту морфологію, а збільшення тиску напilenня сприяло зменшенню зерен покриттів. Титанове покриття, отримане під тиском 1,0 Па, було тонким і однорідним, без явних дефектів, демонструючи оптимальну якість осадження і міцність зчеплення. Крім того, було встановлено, що температура відпалу грає ключову роль в реакції між Тi-покриттям і алмазом. Знову ж таки звертаємо увагу на ключову роль карбіду титану. Фаза TiC в частинках алмаза з покриттям Тi демонструвала поступове збільшення із підвищенням температури, а алмаз з покриттям Тi зазнав повної трансформації в алмаз з покриттям TiC при 1000 °C (рис. 2).

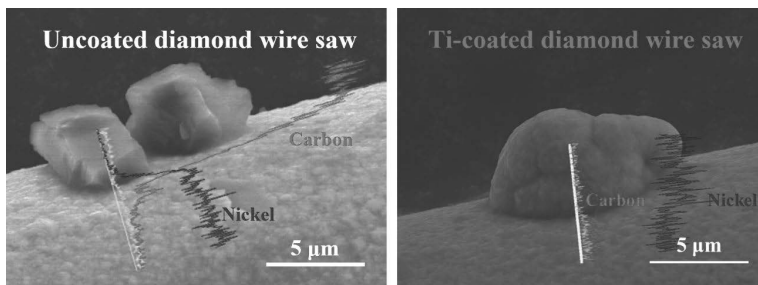


Рис. 1 – Приклади різальної поверхні канатної пили з алмазами без покриття і з титановим покриттям [2]

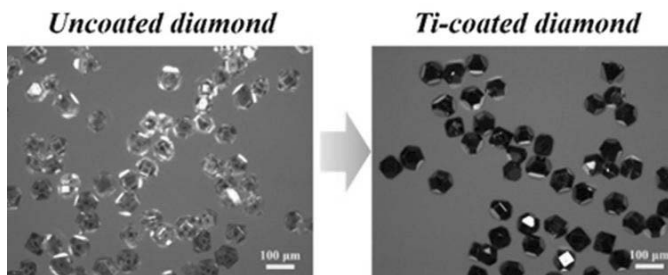


Рис. 2 – Алмази без покриття та з нанесеним покриттям із наявністю TiC [3]

В статті [4] авторами для покриття розглядався вже інший карбід – ванадію. Покриті карбідом ванадію алмази були виготовлені методом розплавленої солі. Результати показали, що у порівнянні з непокритими алмазами статична міцність на стиск і стійкість до окислення покритих алмазів збільшувалися на 42,27% і 158,82 °C відповідно. Покриття з карбіду ванадію переважно склалися з V_2C та VC. Із зростанням температури товщина покриттів збільшувалася. Із збільшенням відносного вмісту ванадію в сировині кристалічна структура пок-

риттів з карбіду ванадію змінилася з мікрокристалічної на сітчасту, а покриття з карбіду ванадію з мікрокристалічною структурою показали кращі експлуатаційні характеристики.

Для поліпшення теплових властивостей композитів алмаз/метал потрібен шар металічного карбіду, який поєднує як кристалічну структуру, так і тепловий переніс гетерогенних інтерфейсів. В статті [5] були проведені експерименти з композитами алмаз/Cu-Cr, щоби встановити вплив двох важливих перемінних для термодифузії: температури (800–1025 °C) та часу витримки (5–60 хв.), на ріст інтерфейсів карбіду хрому і результуючу теплопровідність, на мікроструктурну еволюцію (рис. 3) і відповідні термічні властивості композитів алмаз/Cu-0,8Cr. На першому етапі Cr, диспергований в матриці Cu, дифундував з Cu до поверхні алмаза. Дрібний пластинчастий (flake) карбід Cr утворювався на основі реакції Cr-C. Із збільшенням часу витримки або підвищенням температури пластинчастий карбід Cr зливається в острівну (island) структуру під поверхневою дифузією, що приводить до різниці поверхневої енергії між гранями кристалу {100} та {111} алмаза. Коли дифузія атомів Cr отримує подальшу рухливість, структура «островка» підсумково трансформується в структуру «пористу». Однак з-за конкуренції між карбідами Cr (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$), між шаром карбіду Cr і поверхнею алмаза можуть виникнути тріщини, як показано на рис. 3. При спіканні при 900–950 °C протягом 60 с карбіди Cr переважно схильні до росту і трансформувалися з «опуклої» в ущільнену структуру. Основний висновок роботи [5] полягає в тому, що оптимальною умовою спікання для досліджених композитів алмаз/Cu-0,8Cr є температура 950 °C протягом 60 хв, при якій зразок може досягти максимальної відносної густини (98,11%) і теплопровідності (577 Вт/(м·К)).

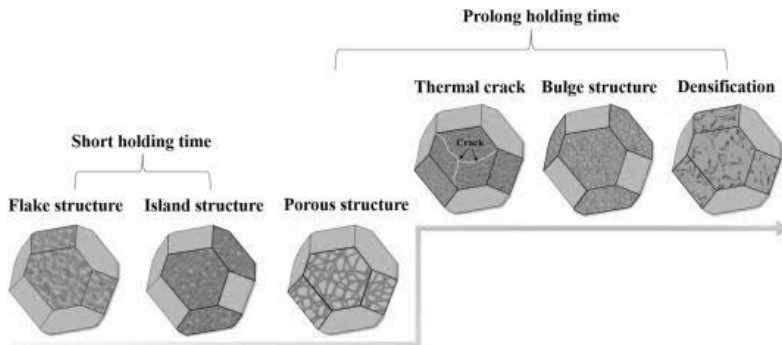


Рис. 3 – Принципова схема еволюції міжшарової структури на поверхні алмазного зерна із зміною карбідного шару [5]

В статті [6] для ефективного придушення термічного окислення і термічного руйнування алмазів при роботі у високотемпературному середовищі було розроблено покриття Мо–В–С для захисту алмазів від окислення.

Вказані покриття були синтезовані на поверхні алмаза із застосуванням алмазів, покритих Mo_2C , порошку бора і борної кислоти. Механізм захисту алмазів в цьому дослідженні представляв собою переважну окисну донорну поведінку покриттів Мо–В–С для формування стабільного оксидного шару на поверхні алмаза. Для покриттів з високим вмістом бору переважний самовідновний потік B_2O_3 не тільки пригнічував випаровування MoO_3 , але і забезпечував відновне середовище для MoO_3 для утворення MoO_2 та Mo_2C з високою температурою плавлення, що приводило до утворення подвійного синергетичного захисного оксидного шару і значно підвищувало стійкість алмазів до окислення. Між тим, захист оксидного шару підтримував міцність алмазів на стиск у високотемпературній окислювальній атмосфері, що свідчить про його гарну застосовність при високих температурах. Стабільні продукти окислення кожного процесу в залежності від температури показані на рис. 4.

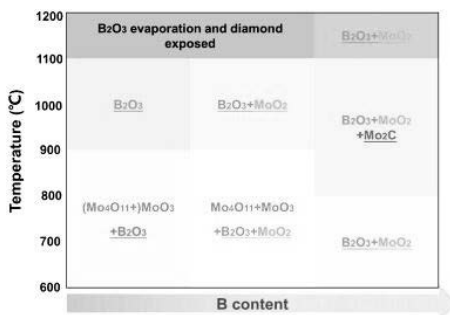


Рис. 4 – Стабільні продукти реакції після рівноважного відпалу при різних температурах для алмазів з покриттям Мо–В–С [6]

Таким чином, з наведеного вище видно, що нині дослідники застосовують як спрямоване нанесення карбідного покриття на алмазні зерна, так і приховане, коли відбувається поява спрямована карбідів у процесі температурного впливу при різних методах нанесення покриттів.

Література

1. Дослідження експлуатаційних характеристик алмазного шліфувального інструменту з алмазами із багатоконпонентними покриттями на основі сумішей із оксидами та карбідами / В. Лаврінченко, В. Полтораць-

кий, О. Бочечка, Г. Петасюк, О. Пасічний, В. Скрябін, В. Солод // Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні : матеріали Міжнародної наук.-техн. конференції, 6–7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса : ОНПУ, 2023. – С. 178–180.

2. Su, S., Zang, J., Zhou, Y., Zhang, X., Liu, W., Wang, Z., Zhao, M., Wang, Y. Ti-coated diamond micro-powder for the manufacture of the electroplated diamond wire saw // *Diamond and Related Materials*. – 2024. – Vol. 147. – 111273.

3. Xu, X., Wan, B., Li, W., Liu, F., Zhai, T., Zhang, L., Tang, G. Reaction mechanisms for Ti coatings on diamond // *Carbon*. – 2024. – Vol. 226. – 119206.

4. Wang, X., Tu, J., Liu, B. Enhancement of mechanical and thermal properties of diamond particles via vanadium carbide coatings // *Diamond and Related Materials*. – 2024. – Vol. 148. – 111510.

5. Cao, Y., Li, B., Liu, L., Li, S., Hui, D., Wang, S., Liu, H., Li, X., Zhang, X., Zhou, S., Li, S. Quantitative control of interfacial structure and thermal conductivity between diamond and copper via thermal diffusion of alloying element // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 33 (Nov.–Dec.). – P. 6641–6655.

6. Mao, X., Meng, Q., Wang, S., Huang, S., Yuan, M., Qiu, Y. Oxidation mechanism and high-temperature strength of Mo–B–C-coated diamonds in the 700°C–1200°C temperature range // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 33 (Nov.–Dec.). – P. 7829–7841.

*Лавріненко В.І., Смоквина В.В., Ільницька Г.Д.,
Скрябін В.О., Бологов П.І., Кошкін О.М.* Інститут
надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ
Солод В.Ю. Дніпровський державний
технічний університет МОН України, Кам’янське
Проц Л.А. Ужгородський національний університет, Ужгород

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЛМАЗНОГО ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗІВ АДГЕЗІЙНО-МАГНІТНИМ СОРТУВАННЯМ В РІДИНІ

В машинобудуванні порошки синтетичного алмазу невеликої міцності марок АС6–АС32 широко застосовуються в процесах механообробки, однак працездатність будь-якого алмазомісткого інструменту

значною мірою визначається характеристиками шліфпорошку алмазу. В даному повідомленні для спрямованої зміни таких характеристик розглянуте адгезійно-магнітне сортування шліфпорошків синтетичного алмазу за однорідністю та міцністю їх зерен і подальше їх застосування в шліфувальному інструменті.

Для отримання відібраних шліфпорошків алмазу з високою термостійкістю та з високою однорідністю за міцністю і лінійними розмірами використовували алмази зернистості 125/100 марки АС20, синтезовані в ростовій системі Ni-Mn-C. Для видалення зі складу шліфпорошку алмазних зерен, що містять металеві внутрішньокристалічні включення та домішки і мають вищу магнітну сприйнятливість, шліфпорошки на початку розділяли в магнітному полі з різною напруженістю магнітного поля від 0 до 2 Т на магнітну і немагнітну фракції. Далі проводили поділ зерен алмазу немагнітної фракції за дефектністю їхньої поверхні за допомогою адгезійно-магнітного розподілу в рідинному середовищі. Перед проведенням розподілу на дефектні ділянки поверхні зерен алмазного порошку у водному середовищі у слаболужному розчині з $pH = 9$ наносили тонкодисперсні феромагнітні частки заліза з розміром часток менш ніж 1000 нм з концентрацію цих часток не більше ніж 2,5%. Після розділення для кожної окремої фракції визначали вихід в %, дефектність поверхні як коефіцієнт поверхневої активності (K_a), руйнівне навантаження (міцність) при стисканні (P), термостійкість ($K_{ТС}$), оцінювали однорідність алмазів за міцністю ($K_{одн.міц}$), та лінійними розмірами ($K_{одн.л.р}$). Результати вимірювання приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати адгезійно-магнітного сортування алмазів марки АС20 зернистості 125/100, з використанням нанесення тонкодисперсних феромагнітних часток у водному середовищі у слаболужному розчині з $pH = 9$

Фракція розподілу	Вихід, %	K_a , %	P , Н	$K_{ТС}$, %	$K_{одн.міц}$, %	$K_{одн.л.р}$, %	Марка за ДСТУ 3292-95
1	11,5	0,57	40,8	93	75	58	АС50
2	34,0	0,71	28,3	90	72	56	АС32
3	43,7	0,89	20,6	75	65	52	АС20 (поліпшена)
4	10,8	1,15	9,5	65	57	50	АС15
Вихідна	100		24,2	85	46	38	АС20 (вихідна)

За результатами випробувань встановлено, що при розподілі за дефектністю поверхні алмазів немагнітної фракції зернистості 125/100, було отримано порошки 1 і 4 фракцій розподілу які за коефіцієнтом поверхневої активності K_a відрізняються між собою приблизно у 2 рази, що забезпечує виділення алмазів марок АС50 та АС32 у кількості 45,5% при чому 11,5% марки АС50. Термостійкість одержаних порошків 1 та 2 фракцій у порівнянні з термостійкістю алмазів 3 і 4 фракцій приблизно на 25% вище. Однорідність за міцністю та лінійними розмірами алмазів цих фракцій приблизно на 20 % вище однорідності алмазів 3 і 4 фракцій.

На другому етапі, досліджували експлуатаційні характеристики алмазних кругів із шліфпорошками синтетичного алмазу марки АС20 125/100 які пройшли спрямоване сортування із застосуванням впливу дії магнітних (електричних) полів. Аналіз даних табл. 1 свідчить, що з вихідної марки АС20 125/100 були примусовим адгезійно-магнітним сортуванням виділені поліпшені порошки АС20 125/100, які хоча і мають трохи менший показник міцності, але у них значно зростають коефіцієнти однорідності за міцністю та лінійним розміром; АС32 125/100, які не тільки переважають вихідні порошки у міцності, але і у коефіцієнтах термостабільності та однорідності за міцністю і лінійним розміром, а також АС50 125/100, які мають переважання у вказаних вище показниках навіть на маркою АС32 125/100.

Ці чотири групи алмазних шліфпорошків АС20 125/100 (вихідний та поліпшений АС20, ті відібрані АС32 та АС50) були застосовані при виготовленні алмазних шліфувальних кругів форморозміру 12А2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08 з відносною концентрацією алмазів в робочому шарі – 100%. Для обробки був вибраний важкооброблюваний вольфрамо-кобальтовий твердий сплав марки ВК6 з розмірами зразка 63×15×7 мм. Шліфування провадилося без охолодження, щоби не вносити додаткових збурень в процес обробки. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,57 м/хв. (для продуктивності обробки 200 мм³/хв.) та 1,14 м/хв. (для продуктивності обробки 400 мм³/хв.). Оцінювалася зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазів (q) та шорсткість обробленої поверхні за показником (Ra). Результати випробувань наведені в табл. 2.

З алмазних порошків АС20 125/100 адгезійно-магнітним сортуванням були отримані порошки АС32 125/100 та АС50 125/100. Порівняння їх працездатності в шліфувальному інструменті підтвердили,

що основним чинником тут є підвищення їх показника міцності. Так, якщо взяти за точку відліку дані по порошку АС50, то відносні витрати алмазів в крузі при шліфуванні твердого сплаву ВК6 за продуктивності 200 мм³/хв. для вихідного порошку АС20 повинні були би скласти – 2,0 мг/г. Експеримент визначив – 2,47 мг/г. Для порошку АС32 розрахунок за міцністю показав – 1,7 мг/г, а експеримент – 1,79 мг/г, що є достатньо близьким і свідчить про те, що саме показник міцності є основним чинником для оцінки алмазних порошоків, отриманих за адгезійно-магнітним сортуванням.

Таблиця 2 – Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% та алмазними зернами АС20 125/100 відібраних за рахунок адгезійно-магнітного сортування в рідині

Характеристика алмазних порошоків	Продуктивність обробки			
	200 мм ³ /хв		400 мм ³ /хв	
	q, мг/г	Ra, мкм	q, мг/г	Ra, мкм
АС20 125/100 (вихідний)	2,5	0,45	4,3	0,71
АС20 125/100 (поліпшений)	0,4	0,39	0,7	0,64
АС20 125/100 (виділення зерен АС32 125/100)	1,8	0,44	1,2	0,42
АС20 125/100 (виділення зерен АС50 125/100)	1,2	0,40	2,9	0,67

Таким чином, комплекс проведених досліджень дозволив встановити наступне: виділення за рахунок адгезійно-магнітного сортування з вихідних зерен АС20 відібраних (поліпшених) зерен АС20 за показниками однорідності за міцністю та лінійними розмірами є найкращим варіантом з точки зору підвищення зносостійкості алмазних кругів (підвищення до 6 разів). Другим варіантом є відібрані зерна АС32 (підвищення до 3 разів). Третім варіантом є відібрані зерна АС50 (підвищення зносостійкості до 1,5 раз). В усіх випадках відібрані зерна за показниками однорідності за міцністю та лінійними розмірами є кращими з точки зору зносостійкості алмазних кругів, аніж круги з суміші вихідних алмазних зерен АС20.

ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ З РЕГУЛЯТОРОМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ/СТРУМУ

У теперішній час механізоване імпульсне MIG/MAG зварювання широко застосовується в різних галузях промисловості та є об'єктом автоматичного управління й регулювання.

Розроблено варіант джерела живлення з достатньо високими швидкодією та коефіцієнтом корисної дії за рахунок застосування високо-частотної імпульсної та інверторної техніки. Структурну схему системи управління джерела живлення для імпульсного дугового зварювання в середовищі захисних газів наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Структурна схема системи управління зварювального джерела живлення

Схему управління виконано на мікросхемі TL494; драйвер управління силового ключа верхнього рівня виконано на мікросхемі IR2125. Вибір у якості ШІМ-контролера низькочастотної мікросхеми TL494 був обумовлений її дуже високою надійністю та заводозахисністю. Збільшуючи або зменшуючи тривалість вмикання силового ключа, регулюється вихідна напруга блоку регулятора. Частота широтно-імпульсної комутації силового ключа становить 100 кГц, смуга пропускання 20–17 кГц. Застосування повномостової схеми у DC-DC перетворювачі забезпечує вдвічі менший струм транзисторів у порівнянні з іншими схемами інверторів, що є важливим для потужних джерел живлення. Резонансний режим значно зменшує динамічні втрати пере-

микання транзисторів моста, оскільки їх комутація відбувається в нулі струму або в нулі напруги.

У блоці управління застосовано 32-х розрядний мікроконтролер із швидкодіючою периферією PIC18F252 з платою MMC Ready Board виготовлення фірми Mikroelektronika, який дозволяє проводити ідентифікацію стадій імпульсного процесу зварювання та реалізацію алгоритмів оптимального управління. Завдяки зворотним зв'язкам за напругою та струмом дуги, з урахуванням швидкості подачі дроту, забезпечується сканування робочої точки та зміни довжини дуги. Таким чином, забезпечується задана швидкість плавлення дроту із заданим об'ємом крапель переносу розплавленого металу.

Розроблене джерело живлення випробувано на активному навантаженні. Інвертор для імпульсного MIG/MAG зварювання має широкий діапазон плавного регулювання вихідної напруги/струму, високі динамічні характеристики відпрацювання програмної зміни вихідної напруги/струму, високий коефіцієнт корисної дії.

Результати роботи дозволять підвищити ефективність процесу дугового зварювання, зменшити масогабаритні характеристики зварювального обладнання, економити електроенергію та зварювальні матеріали, мінімізувати вплив на електричну мережу зварювальних джерел живлення.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЯКОСТІ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Існують два основоположних принципи управління ризиками для якості зварних конструкцій:

- оцінювання ризику для якості має базуватися на даних та бути безпосередньо пов'язаним із захистом споживача;
- рівень зусиль, формалізації та документування процесу управління ризиками для якості має відповідати рівню ризику зварних конструкцій.

Аналіз показав, що управління ризиками для якості – це систематичний процес для загального оцінювання, неруйнівного контролю (НК), інформування та огляду ризиків для якості продукції протягом її життєвого циклу. Модель управління ризиками для якості наведена на

діаграмі (рис. 1). Значення кожного компоненту цієї структури може бути різним в різних випадках, однак надійний процес дослідження враховував всі компоненти, деталізовані до такого ступеня, який відповідає окремому ризику.

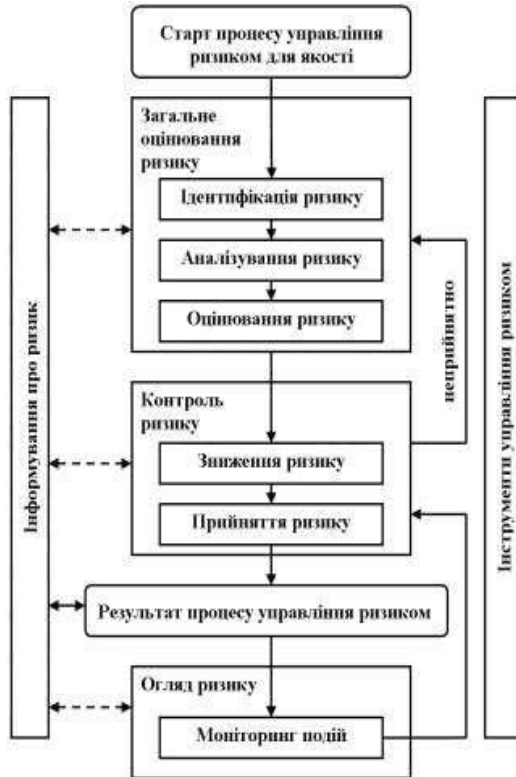


Рис. 1 – Загальна схема типового процесу управління ризиками для якості зварних конструкцій

На наведеній діаграмі не зазначено точки прийняття рішень, оскільки рішення можуть бути прийняті в будь-якій точці процесу. Ці рішення можуть повертати на попередній етап з метою пошуку подальшої інформації, щоб скоригувати моделі ризиків або навіть припинити процес управління ризиками на підставі інформації, що є основою такого рішення в зварювальному виробництві.

Примітка – «Неприйнятно» стосується не тільки законодавчих, адміністративних або регуляторних вимог, а також необхідності переглянути процес загального оцінювання ризику (рис. 1) згідно вимог НД.

Діяльність щодо управління ризиками для якості зварних конструкцій, як правило, але не завжди, рекомендується здійснюється окремими групами. При формуванні груп до них слід включати експертів у відповідних галузях (наприклад, відділ якості, розробка бізнесу, інжиніринг, регуляторна діяльність, технологічні операції, дослідження та маркетинг, юридична служба, статистика) на додаток до осіб, які обізнані щодо процесу управління ризиками для якості зварних конструкцій.

Особи, відповідальні за прийняття рішень, повинні:

- нести відповідальність за координацію управління ризиками за якість між різними функціями та відділами зварювального підприємства;
- гарантувати, що процес управління ризиками для якості є визначеним, приведеним у дію та перевірюваним, а також, що наявні достатні ресурси.

Управління ризиками для якості зварних конструкцій має включати систематичні процеси, що призначені для координації, полегшення та покращення прийняття обґрунтованих рішень стосовно ризику. Можливі етапи, використовувані для планування процесу управління ризиками для якості, можуть включати наступне:

- визначення проблемного питання, що становить собою ризик, що визначає можливість ризику зварних конструкцій;
- збір вихідної інформації або даних стосовно потенційної небезпеки, шкоди, що мають відношення до загального оцінювання ризику;
- призначення керівника та визначення необхідних ресурсів;
- встановлення графіку виготовлення зварних конструкцій, очікувані результати та відповідний рівень прийняття рішення щодо процесу управління ризиками в зварювальному виробництві.

Встановлено, що загальне оцінювання ризику полягає у ідентифікації небезпеки в зварювальному виробництві та аналізуванні й оцінюванні ризиків в зварювальному виробництві, що пов'язані із цією небезпекою.

Загальне оцінювання ризиків для якості рекомендується розпочинати з чіткого опису проблеми ризику. Якщо ризик при дослідженнях є чітко визначеним, легше встановити відповідний інструмент управління ризиками, а також види необхідної інформації щодо аспекту ризику зварних конструкцій.

Для чіткого визначення ризику з метою загального оцінювання ризику зварних конструкцій є корисними три основоположних питання:

- Що може відбуватися неправильно?
- Які наслідки (їх тяжкість)?

- Яка ймовірність (можливість) того, що це буде відбуватися неправильно?

Ідентифікація ризику – систематичне використання інформації, щоб встановити небезпеку стосовно аспекту ризику або для опису проблеми в зварювальному виробництві.

Ідентифікація ризику в попередніх дослідженнях пов'язана з питанням «Що може відбуватися неправильно?», а також з визначенням можливих наслідків. Це забезпечує основу для подальших етапів процесу управління ризиками для якості зварних конструкцій.

Аналізування ризику – оцінка ризику, пов'язана з ідентифікацією небезпеки в дослідженнях. Це процес встановлення якісного та кількісного зв'язку між ймовірністю випадку та тяжкістю шкоди. Для деяких інструментів управління ризиками можливість визначити шкоду (здатність до виявлення) також є фактором оцінки ризику в зварювальному виробництві.

Оцінювання ризику – порівняння встановленого та проаналізованого ризику із заданими критеріями ризику зварних конструкцій. При оцінюванні ризиків необхідно розглядати обґрунтованість доказу щодо всіх трьох основоположних питань.

При загальному оцінюванні ризику важлива надійність набору даних, оскільки це визначає якість результату. Припущення, що виявляють сутність проблеми, та обґрунтовані причини невизначеності будуть підвищувати правильність цього результату або допоможуть визначити його обмеження.

Невизначеність є наслідком неповних знань про технологічний процес у поєднанні з його очікуваною або неочікуваною варіабельністю. Звичайними причинами невизначеності є недостатнє розуміння технологічного процесу, підстави для шкоди (наприклад, неправильні режими процесу), а також недостатня можливість визначення проблем в зварювальному виробництві.

Результатом загального оцінювання ризику є або кількісна оцінка ризику або якісний опис діапазону ризику зварних конструкцій. Якщо ризик виражений кількісно, використовують числову ймовірність. Як альтернатива, ризик може бути виражений з використанням якісних ознак, таких як «високий», «середній» або «низький», які мають бути визначені настільки детально, наскільки це можливо. При кількісному загальному оцінюванні ризику оцінювання ризику передбачає ймовірність специфічного наслідку, представленого як сукупність обставин, що сприяють виникненню ризику зварних конструкцій.

Кількісна оцінка є корисною стосовно одного конкретного наслідку за один раз. Як альтернативу, деякі інструменти управління ризиками використовують відносну міру ризику зварних конструкцій у поєднанні з множинними рівнями тяжкості та ймовірності для загальної оцінки відносного ризику при дослідженнях.

Лопата Л.А., Буйських К.П., Лопата О.В. Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ
Солових А.Є. Центральнуукраїнський національний технічний університет, Кропивницький

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ

Засоби транспорту – складна технічна система, яка складається з багатьох вузлів, агрегатів і окремих деталей, надійність яких впливає на безпеку їх роботи. Ефективність використання засобів транспорту обмежена встановленими ресурсами та строками служби. Основною причиною втрати працездатності деталей засобів транспорту є зношування (80-90% від спільної кількості відмов). Одна з причин недостатньої зносостійкості деталей засобів транспорту пов'язана з обмеженим використанням при їх виготовленні і ремонті зносостійких матеріалів, технологій зміцнення і захисних покриттів. Найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення зносостійкості деталей засобів транспорту є нанесення на їх робочі поверхні композиційних покриттів, перевагами яких є висока міцність, жорсткість і зносостійкість. Композиційні покриття приймають на себе частину функціональних властивостей робочих поверхонь деталей засобів транспорту (зносостійкість, контактну міцність тощо) і тим самим забезпечують виготовлення деталей із менш дефіцитних і більш дешевих матеріалів. Існує достатньо багато методів нанесення композиційних покриттів, кожен з яких може служити темою окремого дослідження. Велике значення має правильний вибір досить простих і доступних способів нанесення композиційних покриттів. Розробці способів відновлення деталей композиційними покриттями для забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту присвячені

роботи К.А. Ющенко, Ю.С. Борисова, Ю.С. Харламова, Б.А. Ляшенко, Є.К. Посвятенко та інших вчених.

Проведений аналіз попередніх патентно-інформаційних досліджень та літературних джерел дозволяє зробити наступні висновки:

- довговічність деталей засобів транспорту, що експлуатуються, знаходиться в прямій залежності від здатності протистояти корозійно-механічному зносу їх робочих поверхонь;
- найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей засобів транспорту є застосування покриттів із композиційних матеріалів;
- вирішення поставленої проблеми пов'язане з розробкою технологічних способів нанесення композиційних покриттів.

Обґрунтований пошук і розробка високопродуктивних і простих в експлуатації технологій відновлення деталей засобів транспорту для досягнення високих показників їх надійності – актуальна проблема. Вирішення цієї проблеми вимагає впровадження в практику зміцнення, відновлення і підвищення надійності деталей засобів транспорту нових і вдосконалення існуючих процесів ремонту, що базуються на дослідженнях в області нанесення композиційних покриттів.

Вибір методу формування композиційних покриттів визначається наступними чинниками: конструкцією деталі; видом матеріалу деталі, складом композиційних матеріалів; поєднанням процесів відновлення (виготовлення) деталі і отримання покриття; економічною доцільністю. Найчастіше використовуються технологічні процеси: пресування, прокатка, плазмове напилення, комбіновані методи, наприклад, плазмове напилення з подальшим ущільненням і інші. Обґрунтовано, що серед способів нанесення композиційних покриттів найбільш поширений, найдешевший і найпростіший метод електродугового напилення.

Важливою умовою подальшої працездатності зміцнених і відновлених деталей засобів транспорту композиційними покриттями є узгодженість термомеханічних характеристик композиційного матеріалу і матеріалу деталі. Матеріал деталі повинен мати мінімальну різницю коефіцієнтів термічного розширення в порівнянні з матеріалом покриття, забезпечити максимальну міцність зчеплення з ним. Іншими словами, композиційні покриття і матеріал деталі повинні мати «експлуатаційну сумісність». Таким чином, вибір компонентів композиційного матеріалу обмежується їх сумісністю. Вирішення проблеми регулювання сумісності компонентів в композиційному покритті дає можливість їх використання в повному обсязі. Одним з підходів вибо-

ру матеріалу композиційного покриття є встановлення зв'язків у системі «експлуатація-матеріал», а з позиції технології - в умовному трикутнику «склад-структура-властивість».

Для ефективного вирішення проблеми підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту композиційними покриттями організація досліджень була представлена у вигляді структурної схеми, яка включає:

- обґрунтування актуальності проблеми роботи, визначення мети, постановку завдань та шляхи їх вирішення;
- аналіз існуючих способів відновлення і зміцнення, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей засобів транспорту;
- вибір складу композиційного матеріалу та способу нанесення композиційного покриття, що дозволить вирішити поставлену проблему.

В результаті виконання досліджень розроблені основні принципи підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту, що відображають функціональні, матеріально-технічні та технологічні аспекти їх ремонту шляхом використання композиційних покриттів. Реалізація принципів базується на використанні конструктивних особливостей деталей засобів транспорту, аналізі складу композиційного матеріалу та виборі способу нанесення композиційного покриття, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

При проведенні досліджень використовували композиційні покриття системи (NiCr – Cr₃C₂). Покриття наносили на циліндричні зразки (діаметр 120 мм). Матеріал зразків – сталь 45. Матеріал покриття - порошковий дріт, що складається з композиційного матеріалу КХН15 (85% Cr₂C₃ + 15% Ni) і КХН30 (70% Cr₂C₃ + 30% Ni). Покриття наносили методом електродугового напилення без підшару і з використанням підшару з ніхрому (Ni-Cr 80/20).

Після досліджень, проведених на експериментальних зразках композиційні покриття наносили на поверхні деталей засобів транспорту, Приклади деталей засобів транспорту з композиційними покриттями представлені на рис. 1.

Висновок. Шляхом проведених досліджень і їх аналізу показана ефективність нанесення покриттів із композиційних матеріалів для підвищення зносостійкості та ресурсу засобів транспорту в процесі відновлення їх деталей. Обґрунтовано, що серед способів нанесення композиційних покриттів найбільш поширений, найдешевший і найпростіший метод електродугового напилення.

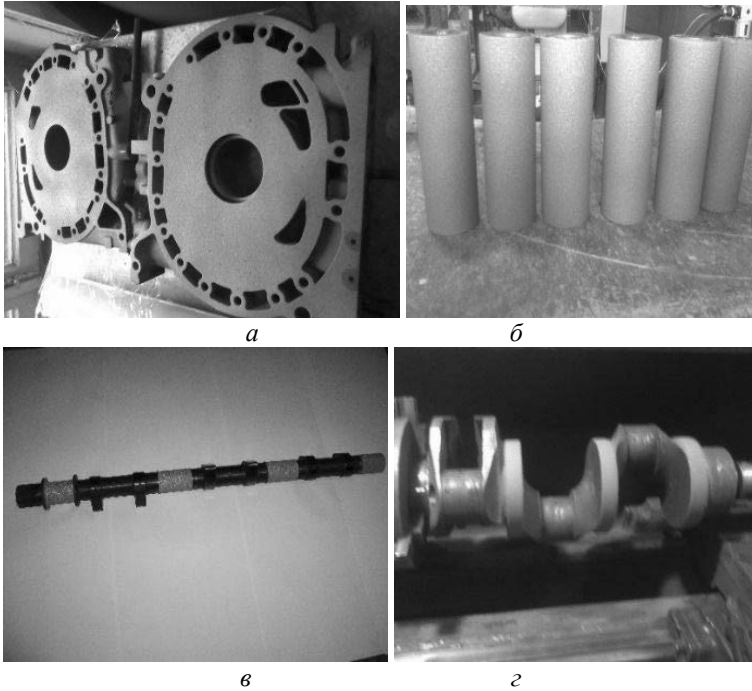


Рис. 1 – Приклади відновлених і зміцнених деталей засобів транспорту:
a – деталь ротора автомобіля Mazda; *б* – палець поршня (сталь 12ХН3А-42, 58 HRC, $h = 0,8-1,5$); *в* – розподільчий вал 20-0715А (сталь 45, 163–207 НВ, $h = 0,1-2,5$); *г* – колінчастий вал (сталь 18Х2Н4МА, 55–60 HRC, $h = 1,5-3,5$)

Запропоновані основні принципи підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту, що відображають функціональні, матеріально-технічні та технологічні аспекти їх ремонту шляхом використання композиційних покриттів. Реалізація принципів базується на аналізі конструктивних особливостей деталей засобів транспорту та складу композиційних матеріалів, використовує статистичні і математичні методи, експериментальних дослідженнях.

З метою вирішення проблеми підвищення експлуатаційних властивостей та збільшення ресурсу деталей засобів транспорту представлено структурну схему дослідження, що включає: обґрунтування актуальності проблеми досліджень, визначення мети, постановку завдань і шляхів їх вирішення; аналіз існуючих методів формування покриттів, вибір їх складу.

Відновлення деталей засобів транспорту шляхом нанесення композиційних покриттів, вибір складу композиційного матеріалу, керу-

вання його складом і структурою в процесі відновлення і зміцнення дозволило підвищити експлуатаційні властивості деталей більш ніж в 2 рази та вирішити проблему забезпечення їх строку служби, який не поступається ресурсу нових деталей.

Лопата В.М. Інститут електрозварювання
імені Є.О. Патона НАН України
Качинська І.Р. Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ
Черновол М.І., Катеринич С.Є. Центральноукраїнський
національний технічний університет, Кропивницький

ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ СКЛОЕМАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

Багато публікації, що стали класичними, присвячені розрахунку часу нагрівання частинок порошоків при газотермічному напиленні (ГТН), що не враховують теплопровідність матеріалу, який напилюється [1-3]. Існуючі теоретичні розробки, присвячені розрахунку часу нагрівання часток порошоків при ГТН, не враховують теплопровідність напилюваного матеріалу та справедливі для матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності не менше 10 Вт/м·К. Оскільки аналіз існуючих публікацій не дозволяє однозначно відповісти на питання – чи можна отримати якісне склоемалеве покриття традиційним газополуменевим способом (ГПН), необхідно виконати аналітичну оцінку теплового стану емалевих частинок в факелі терморозпилювача в момент контакту з поверхнею деталі. В основу теоретичного аналізу покладено методику розрахунку, запропоновану в роботі [2], яка розглядає теплообмін між нагрітим газом і частинками порошку. При цьому вважається, що температура газу залишається постійною, тобто відсутній теплообмін між факелом і навколишнім середовищем.

При дослідженні було розглянуто теплообмін між газом і частинками порошку на початковій ділянці факела, де швидкості руху продуктів згоряння та частинок збільшуються, досягаючи своїх максимальних значень на дистанції 100–170 мм від зрізу сопла. Рівняння збереження потоку енергії можна записати у вигляді [2]:

$$F_1 \left(\frac{V_1^2}{2} + i_1 \right) + F_2 \left(\frac{V_2^2}{2} + i_2 \right) = F_{1,0} \left(\frac{V_{1,0}^2}{2} + i_{1,0} \right) + F_{2,0} \left(\frac{V_{2,0}^2}{2} + i_{2,0} \right), \quad (1)$$

де F_1 і F_2 – витрати газу і порошку; I_1 та I_2 – їх ентальпії; V_1 і V_2 – їх швидкості руху. Індекс "0" відноситься до значень параметрів у зрізу сопла.

У рівнянні (1) ентальпія одиниці маси речовини газу або порошку може бути записана у вигляді:

$$i = E_e + PV, \quad (2)$$

де E_e – внутрішня енергія одиниці маси речовини; V – питомий об'єм; P – тиск в точці.

В області, близької до вісі струменя можна прийняти:

$$F_1 = \psi_1 \rho_1 V_1 S; \quad (3)$$

$$F_2 = \psi_2 \rho_2 V_2 S, \quad (4)$$

де ρ_1, ρ_2 – питома маса газу і порошку, відповідно; ψ_1, ψ_2 – об'ємні частки газу і частинок в потоці, відповідно; S – перетин потоку; $\psi_1 + \psi_2 = 1$, причому $\psi_1 \ll 1$, $\psi_2 \approx 1$.

Закон збереження потоку імпульсу в двофазному потоці має вигляд:

$$F_1 V_1 + F_2 V_2 = F_1 V_{1,0} + F_2 V_{2,0}. \quad (5)$$

Звідки можна записати:

$$V_1 = V_{1,0} + K_0 (V_{2,0} + V_2), \quad (6)$$

де $K_0 = F_{2,0} / F_{1,0}$.

Використовуючи (3) і (4), рівняння (1) можливо записати у вигляді:

$$\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_{1,0}^2}{2} + K \left(\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_{1,0}^2}{2} \right) = i_1 - i_{1,0} + K_0 (i_1 - i_{2,0}). \quad (7)$$

При ГПН зміна кінетичної енергії частинок незначна у порівнянні з приростом ентальпії Δi . Оскільки $\Delta i = C \Delta T$ (де C – теплоємність речовини, T – приріст температури), маємо:

$$C_1 (T_{1,0} - T_1) \approx K_0 C_2 (T_2 - T_{2,0}), \quad (8)$$

де $\Delta i_1 = C_1 (T_{1,0} - T_2,0)$; $\Delta i_2 = C_2 (T_2 - T_{2,0})$.

Для вирішення питання про характер теплообміну між газом і частинками використовували критерій Біо, що характеризує зв'язок між полем температур в тілі та умовами тепловіддачі на його поверхні [3]:

$$B_i = \alpha r_2 / \lambda_2, \quad (9)$$

де r_2, λ_2 – радіус частинки порошку і коефіцієнт теплопровідності склоемалі, відповідно; α – коефіцієнт тепловіддачі, який можна представити у вигляді [3]:

$$\alpha = (\lambda_1 / d_2) (2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}), \quad (10)$$

де d_2 – діаметр частинки; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандля.

Для умови, коли температура частинок порошку менше температури їх плавлення, можна записати:

$$\frac{4}{3} \pi r_2^3 \rho_2 C_2 \frac{dT_2}{d\tau} = 4 \pi r_2^2 \alpha (T_1 - T_2). \quad (11)$$

Рівняння (11) являє собою рівняння теплообміну між газом і часткою емалі. Виходячи з (8) і (11) отримуємо:

$$T_1 \approx T_{1.0} + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} T_{2.0} - \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} T_2; \quad (12)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = \frac{6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \left[T_{1.0} + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} T_{2.0} \right] \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) T_2. \quad (13)$$

Із (12) та (13) остаточно отримаємо вираз:

$$T_2 = T_{2.0} + (T_{1.0} + T_{2.0}) \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) \left[\frac{\left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) 6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \right]^{1-e}. \quad (14)$$

З допустимою похибкою вираз (14) можна переписати у вигляді:

$$T_2 = T_2 \left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) \left[\frac{\left(1 + \frac{F_2 C_2}{F_1 \rho_1 C_1} \right) 6\alpha}{C_2 \rho_2 d_2} \right]^{1-e}, \quad (15)$$

де T_3 – усереднена температура факела по його вісі на відстані 50–150 мм від зрізу сопла.

Аналіз результатів розрахунків за формулою (15) показує, що навіть наближена оцінка температур порошку в пропан-бутан-кисневому полум'ї (похибка близько 30%) дозволяє стверджувати – частинки склоемалі розміром 50 мкм і більше не можуть бути розплавлені відомими газополуменевими розпилювачами. Навіть якби щільність теплового потоку факела різко не убуває після 150 мм від зрізу сопла, а залишалася рівною величині, яка забезпечує T_3 ще на 50–70 мм, цього все одно не вистачить для повного розм'якшення частинок склоемалі.

Одним з можливих шляхів вирішення проблеми ГПН склоемалі є використання додаткових джерел тепла, які повинні збільшити або потужність теплового потоку терморозпилювача або протяжність «активної» зони факела. Використовуючи вираз (15) отримана аналітичним шляхом залежність довжини активної зони факела від теплопровідності порошкового матеріалу з $T_{nl} = 900\text{--}1200$ °С (рис. 1).

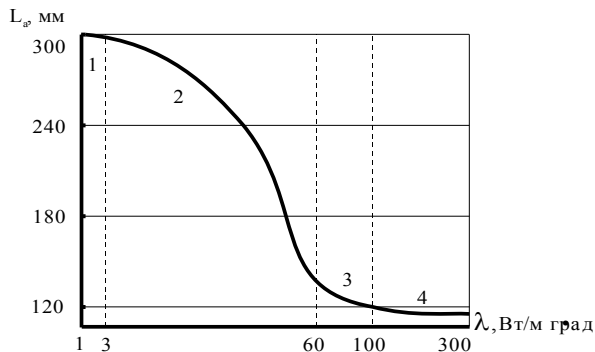


Рис. 1 – Залежність довжини необхідної «активної» зони факела від теплопровідності напилюваного порошкового матеріалу ($T_{пл} = 900–1200\text{ }^\circ\text{C}$): 1 – склоемаль; 2 – нікелевий сплав ПГ-12Н-01; 3 – латунь Л-59; 4 – мідь ПМС-1

Діаметр частинок $\approx 50–75\text{ }\mu\text{м}$. Збільшивши якимось чином протяжність факела, можна припустити, що мета – напилення склоемалі газополуменевим методом, буде досягнута [3].

На підставі виконання аналізу газодинамічної моделі двофазного потоку в терморозпилюючих установках, оцінено температуру газу і часток порошку, а також аналіз процесу теплообміну в системі «подовжений факел-частки порошку з низькою теплопровідністю», теоретично була доведена можливість напилення емалей газополуменевим методом за рахунок збільшення довжини факела. Дана аналітична оцінка теплового стану емалевих часток у факелі та у момент контакту з основою. Теоретично визначені значення температур частинок склоемалі та газової фази вздовж вісі факелу. Встановлено, що частинки склоемалі не можуть бути розм'якшені в полум'ї відомих терморозпилювачів внаслідок малої довжини високотемпературної зони факела. Теоретичний аналіз процесу теплообміну в системі «факел-частинки порошку з низькою теплопровідністю» (на прикладі порошоків склоемалей) показав, що для їхнього розм'якшення необхідно збільшити тривалість перебування порошку у факелі до $(5,5–7,0) \cdot 10^{-3}\text{ с}$. Аналітична оцінка теплового стану емалевих частинок у факелі пальника та у момент контакту з поверхнею деталі показала можливість напилення порошоків з матеріалів із низькою теплопровідністю газополуменевим методом за рахунок збільшення довжини факела полум'я до 200–300 мм. Для збільшення довжини факела запропоновано: утворювати вторинний факел на відстані від сопла терморозпилювача; теоретично визначити дистанцію формування вторинного факелу.

Література

1. Харламов, Ю. А. О роли скорости и температуры частиц при газотермическом напылении / Ю. А. Харламов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 3. – С. 12–17.

2. Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., Boulos, M. I. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part / P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, M. I. Boulos. – New York ; Heidelberg ; Dordrecht ; London : Springer, 2014. – 1566 p. – ISBN 978-0-387-28319-7 (print), ISBN 978-0-387-68991-3 (eBook). – DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3.

3. Кропивный, В. Н., Лопата, В. Н. Газопламенное напыление удлиненным факелом / В. Н. Кропивный, В. Н. Лопата // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 2-й Межд. науч.-техн. конф. – Київ, 2002. – С. 204–207.

Лупкін Б.В., Андреев О.В. ДП «Антонов», Київ
Andrzej Dzierwa. Rzeszow University of
Technology, Rzeszow, Poland
Антонюк В.С., Вислоух С.П., Волошко О.В. Національний
технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

ОЦІНКА ОБРОБЛЮВАНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МАРКИ АL-БОР В ПРОЦЕСІ РОЗРІЗАННЯ

Використання металевих композиційних матеріалів (МКМ) в конструкціях літаючих апаратів, завдяки їх високій питомій міцності і жорсткості, дозволяє досягнути дуже важливого ефекту – зниження маси виробу. Але використання МКМ визначається не тільки механічними, але і фізичними властивостями – електричними, магнітними, акустичними тощо. Однак їх широке впровадження в машинобудуванні стримується відсутністю науково-обґрунтованих технологічних рекомендацій з їх механічного оброблення для всіх операцій різання [1, 2].

Металеві композиційні матеріали (МКМ) за своєю структурою матеріали, які у якості матриці застосовуються метали і сплави, а в якості наповнювача металеві волокна. В силу специфіки їх структури і механічних властивостей вони мають ряд відмінних властивостей гомогенних матеріалів при механічному обробленні [3].

Використання металевих високоміцних волокон бору значно підвищує фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів.

Найбільш ефективно використання металевих композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі, в конструкціях працюючих в умовах високих статичних, циклічних, ударних, вібраційних; низьких – високих і надвисоких температурах та агресивних середовищах, там де стримується використання традиційних металевих матеріалів.

Метою роботи є оцінка оброблюваності композиційних матеріалів в процесі розрізання листових композитів марок алюміній-сталь, алюміній-бор та визначення ефективних марок алмазних відрізнних кругів.

Розрізку металевих композиційних матеріалів із листових матеріалів виконували на фрезерному 675П і заточному ЗД624Е верстатах з використанням відрізнних алмазних кругів зернистістю 200/160–400/350 та абразивних кругів з карбіду кремнію чорного на бакелітовій основі.

Процес пазового фрезерування металевих композиційних матеріалів алюміній-сталь (Al-X18H9T) та Al-бор (ВКА-2), товщиною 2,5 мм з $V_B = 40\%$ наповнювачем волокон бору, виконували на фрезерному верстаті 675П кінцевими фрезами із ВК8 $\varnothing 16$ мм з геометричними параметрами $\omega = 0^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 12^\circ$ з режимами різання: число обертів фрези $n = 63 \text{ хв}^{-1}$, поздовжньою подачею $S_p = 2\text{--}5 \text{ мм/хв}$.

Для експериментів використовували зразки матеріалу ВКА-2 з розмірами $L = 150$ мм, товщиною 2,5 мм з 40% об'ємним вмістом волокон бора.

Всі експериментальні дослідження оброблюваності металевих композиційних матеріалів алюміній-сталь (Al-X18H9T) та Al-бор (ВКА-2) проводили без використання мастильно-холодильних рідин.

Для вимірювання складових сил різання в процесі розрізання металевих композиційних матеріалів використовували динамометра УДМ-100. В якості змінних факторів прийняті параметри режимів різання – швидкість V і подача S .

На рис. 1, а показано зразки розрізаних заготовок без задирок, а на рисунку 1, б із задирами в момент коли круг втрачає свою працездатність і починає наступати процес «засалювання».

Процес «засалювання» абразивних кругів, при різанні МКМ Al-бор, обумовлений підвищенням адгезійних сил між хімічно активною алюмінієвою стружкою і металічною зв'язкою.

На рис. 2, а показано залежності складової сили подачі різання P_x від швидкості різання V відрізнним кругом АОК 100x2x20 250/200 АС-6 на зв'язці МП-1.

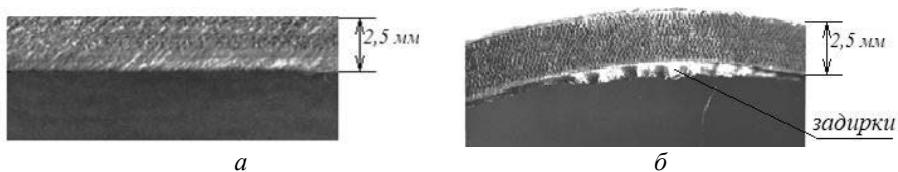


Рис. 1 – Вид поверхні після різання композиційного матеріалу Al-бор (ВКА-2) товщиною 2,5 мм алмазним кругом АОК 250/200 АС32-МП1 (G_c): поверхня без задирок (а); поверхня із задирками (б)

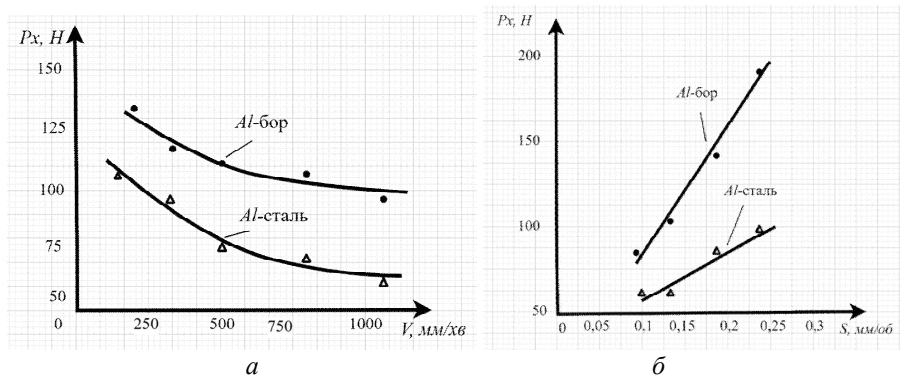


Рис. 2 – Залежність складової сили P_x при різанні матеріалів Al-сталь і Al-бор відрізним кругом АОК 100×2×20 250/200 АС-6 на зв'язці МП-1, від швидкості від різання при подачі $S_{pr} = 0,1$ мм/об (а) та від подачі при швидкості різання $V = 1000$ м/хв (б)

Аналіз графіків показав, що із збільшенням швидкості різання сила P_x зменшуються, причому, для матеріалу Al-бор (ВКА-2), зменшення проявляється в меншій мірі, ніж для матеріалу Al-сталь (Al-X18H9T), що можна пояснити більшою твердістю і міцністю борних волокон.

На рис. 2, б із залежностей $P_x = f(S)$ можна зробити висновок про значний вплив подачі на силу P_x , що пояснюється зростанням навантаження на різальні кромки алмазного зерна у зв'язку із збільшенням частки об'єму матеріалу, що знімається.

Шорсткість розрізаної поверхні металевих композиційних матеріалів визначали за допомогою профілографа MarSurf PS1(Carl Mahr Holding GmbH, Німеччина).

Для експериментальних досліджень використовували алмазні круги з зернистістю від 200/160 до 400/315; виготовлених за технологіями гальванічного (G_c) і вакуумного спікання (B_c), з непереривною різальною кромкою (H_p), та переривистою – сегментною ($П_p$).

Діаметр кругів 100 мм, товщина 2,0 мм і металева зв'язка МП-1.

Для алмазного інструменту, що працює в режимі мікрорізання характерним видом зносу є створення площадки зносу в результаті сколювання і відриву зерен із зв'язки за рахунок силового і теплового навантаження.

В алмазних інструментах виготовлених методом порошкової металургії і гальваностегії закріплення зерна відбувається за рахунок сил механічного зчеплення без хімічної адгезійної взаємодії, тому різальна частина зерна виступає на 20...30% над зв'язкою.

В кругах вакуумного спікання в присутності рідкої фази, за рахунок адгезійної зв'язки з перехідних адгезійно-активних металів (Ti, Cr, Zr, Mn, Nb, V), алмазне зерно додатково надійно утримується, а його різальна частина виступає на 2/3 над зв'язкою.

Процес різання композиційного матеріалу Al-бор (ВКА-2) алмазним інструментом, суттєво відрізняється від різання гомогенних конструкційних матеріалів, у яких видалення матеріалу виконується пластичним деформуванням.

При обробленні бороалюмінієвих матеріалів алмазне зерно інструмента додатково приймає участь в крихкому руйнування твердих борних волокон.

Аналіз залежностей шорсткості від швидкості різання $Rz = f(V)$ показує на попереднє зниження шорсткості до швидкості в області $V = (3,5-4,5) \cdot 10^3$ мм/хв для всіх досліджуваних кругів (рис. 3, а).

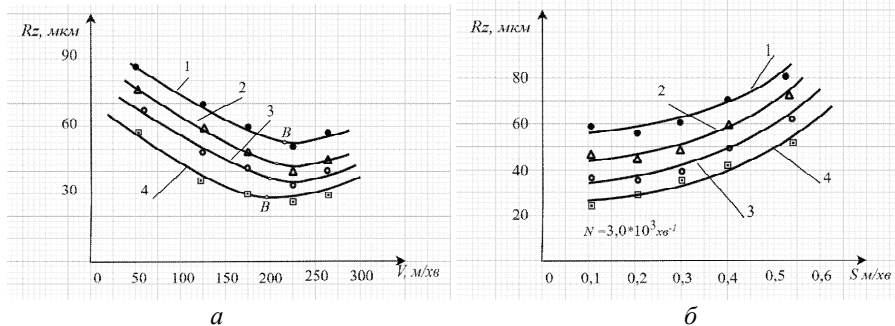


Рис. 3. Залежність шорсткості Rz при розрізанні композииту Al-бор (ВКА-2), товщиною 2,5 мм, $V_B = 40$ % волокон бору: від швидкості обертання (N) при подачі – $S = 0,35$ мм/об (а); від подачі ($S_{нд}$) при $N = 3000$ хв⁻¹ (б):
 1 – НРК, АС15, 400/315 (Гс-МП-1); 2 – НРК, АС15, 250/200 (Г-МП-1);
 3 – НРК, АС15, 250/200 (Вс-МП-1); 4 – НРК, АС15, 250/200 (ВС-МП-1);

Ця залежність пояснюється тим що в межах швидкостей $V = (4-5) \cdot 10^3$ мм/хв знижується стійкість алмазних кругів, що спричиняє збільшенню шорсткості.

Аналізуючи графіки (див. рис. 3) залежності шорсткості від структури алмазного круга, можна зробити такі висновки:

– із збільшенням зернистості Rz збільшується;

– використання кругів с переривистою кромкою (Pr) знижує шорсткість.

Загальний аналіз досліджень використання алмазних кругів при розрізанні композиційних матеріалів вказує на перевагу алмазних кругів виготовлених за технологією вакуумного спікання (Bc) а також з алмазними зернами з більшою руйнівною міцністю ($AC32 > AC15$).

Встановлено, що для забезпечення ефективного процесу розрізання композиційних матеріали Al-бор (ВКА-2), алмазні круги повинні мати статичну стійкість не нижче AC15 і зернистість не менше 250/160.

Література

1. Lupkin, B., Andrieiev, O., Maiorova, K., Antonyuk, V., Vysloukh, S. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 3/1 (123). – С. 59–67. – DOI: 10.15587/1729-4061.2023.279618.

2. Lupkin, B., Andrieiev, O., Maiorova, K., Antonyuk, V., Tolstoj, S. Experimental Studies of the Holes Quality Parameters in Polymer Composite Materials // Karabegovic, I., Kovačević, A., Mandzuka, S. (eds). New Technologies, Development and Application VII. NT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1069. – Cham : Springer, 2024. – DOI: 10.1007/978-3-031-66268-3_60.

3. Matoshyn, O., Vysloukh, S., Antonyuk, V., Voloshko, O. Modeling and Optimization of the Process of Drilling Holes in Carbon Fiber Reinforced Polymer Parts // Advanced Manufacturing Processes VI. Selected Papers from the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024). – 2024. – С. 300–310. – DOI: 10.1007/978-3-031-82746-4_27.

*Олійник Н.О., Льницька Г.Д., Петасюк Г.А.,
Базалій Г.А., Заболотний С.Д.* Інститут надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,
Сизоненко О.М. Інститут імпульсних процесів і
технологій НАН України, Миколаїв,
Рудь В.Д. Луцький національний технічний університет, Луцьк
Циба М.М. Інститут сорбції та проблем ендекології
НАН України, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ СПОСОБОМ ІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ РОЗРЯДАМИ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Порошки синтетичного алмазу застосовують у різних галузях промисловості. Для отримання високоякісних однорідних порошків за певними характеристиками та направлено сформованою поверхнею зерен необхідні нові методи модифікування порошку.

Метою даного дослідження є вивчення впливу способу модифікування вихідного порошку методом імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами (ВЕР) у водному середовищі на зміну фізико-механічних, фізико-хімічних, адсорбційно-структурних та морфометричних характеристик.

Дослідження проведено на зразках порошку алмазу марки АС20 зернистістю 100/80, який синтезовано в системі Ni-Mn-C. ВЕР оброблення проведено на експериментальному стенді в дистильованій воді із забезпеченням в каналі розряду тиску 800 МПа та сумарної енергії оброблення 1000 кДж.

На зразках вихідного порошка та після його модифікування визначали показники основних фізико-механічних, фізико-хімічних, адсорбційно-структурних та морфометричних характеристик за методиками, які наведені у нормативної документації України. Адсорбційно-структурні характеристики визначали шляхом аналізу ізотерм низькотемпературної адсорбції азоту з використанням газоадсорбційного аналізатора NOVA 2200 "Quantachrome" (США). Із застосуванням приладу Dialnspect.OSM фірми Vollstaedt Diamant GmbH та методів скануючої мікроскопії визначали: показники морфометричних характеристики.

За результатами експериментального дослідження встановлено, що в порівнянні з показниками вихідного порошку (прийнято за 100%), застосування способу імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами у водному середовищі призводить: до зміни фізико-

механічних, та фізико-хімічних та адсорбційно-структурних характеристик. Зокрема середнє значення міцності при статичному стиску зерен знижується та становить 77,6% від показника вихідного порошку, однорідність за міцністю становить 100%, масова частка домішок (неспалимий залишок) – 9,6%, питома магнітна сприйнятливність 1,4%, абразивна здатність 118%; частка основної фракції зернового складу (100/80) – 3,9%; коефіцієнт поверхневої активності 120%; питома площа поверхні ($S_{БЭТ}$) – 105%; енергія адсорбції 110%, питома об'єм пор – 150%; середній радіус пор – 140 %; вільна енергія насичення поверхні порошку парою води (гідрофільність) – 73 %. Морфометричні характеристики (компактність (формфактор), шорсткість проекції зерен, кількість загострення різальних кромки та середнє значення кутів загострення різальних кромки) вихідного порошку та порошку після модифікування майже не змінюються.

Розподіл за розмірами вихідного порошку марки АС20 зернистості 100/80 знаходиться в інтервалі від 40 до 150 мкм. ВЭР модифікування порошку надає інтенсивний вплив на розподіл зернового складу вихідного шліфпорошку який оброблюють. Основний діапазон розподілення знаходиться в інтервалі від 20 до 120 мкм фракції неklasифікованого залишку розміром від 1 до 2 мкм становлять 0,8%.

Висновки. Встановлено, що модифікування порошку за рахунок оброблення ВЕР в рідині, призводить до зміни показників фізико-механічних, фізико-хімічних, адсорбційно-структурних та морфометричних характеристик. Зокрема відбувається зниження масової частки домішок, питомої магнітної сприйнятливості та підвищення коефіцієнту поверхневої активності, питомої площі поверхні ($S_{БЭТ}$), енергії адсорбції, питомого об'єму пор їх середнього радіусу.

Знижений вміст основної фракції зернового складу (100/80) до 73,9% та знижена вільна енергія насичення поверхні порошку парою води (гідрофільність) до 73% від вмісту вихідного порошку свідчать, що для подальшого отримання порошку полідисперсного складу з певними характеристиками для багатофункціонального застосування необхідно застосування сортування та модифікування із застосуванням нових процесів розподілення.

Дослідження виконано за темою III-4-25 (0789) «Вивчення дефектності поверхні зерен синтетичного алмазу широкого діапазону міцності (АС6-АС160) та її впливу на експлуатаційні характеристики алмазного інструменту». Держ. реєстрац. номер 0125U000040. Пост. Бюро ВФТПМ НАНУ від 10.12.2024 р., протокол № 23 та Меморандумом про співпрацю між Луцьким національним технічним університетом та ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України.

ОРИГІНАЛЬНЕ МЕТОДИЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СПРОЩЕНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ В ЗАДАЧАХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Прикладні задачі інструментального матеріалознавства досить часто включають оцінювання кореляційного взаємозв'язку між сукупністю отримуваних експериментальних даних. Структура таких експериментальних даних в зазначеній прикладній сфері зазвичай така, що одна частина їх стосується значень залежного фактору, інша (значно більша) – значень незалежних факторів.

В завдання подібних досліджень входить вивчення взаємозв'язку технологічних властивостей абразивних шліфпорошків і експлуатаційних параметрів шліфувального інструменту з показниками обробки, зокрема з відносною витратою абразиву і з шорсткістю обробленої поверхні [1, 2] та витрати алмазу з швидкістю різання [3]. Особливістю прикладних задач у сфері інструментального матеріалознавства є обмежена невелика сукупність наявних експериментальних даних. Це обумовлено тим, що практична реалізація випробувань з отримання експериментальних даних в обсязі згідно методики планування багатфакторних експериментів [4], є тривалою в часі і високовартісною процедурою. Тому такі експериментальні дані не завжди відповідають умовам, за яких до них може бути застосований класичний (повний) кореляційний аналіз. Тому в подібній ситуації оправданим в методичному сенсі є проведення спрощеного кореляційного аналізу. На відміну від класичного кореляційного аналізу, який включає вивчення сили зв'язку між двома і більше ознаками досліджуваного об'єкта, встановлення факторів, що найбільш суттєво впливають на результативну ознаку, виявлення невідомих причинно-наслідкових зв'язків між ознаками об'єкта [5], спрощена процедура такого аналізу передбачає визначення лише коефіцієнтів парної кореляції та, в кращому випадку, додатково ще і коефіцієнт множинної кореляції.

Необхідність у розробці оригінального комп'ютерно-програмного забезпечення була обумовлена також і ще одним типом обставин. З електронного ресурсу відомі за подібним призначенням комп'ютерно-програмні засоби (наприклад пакет STATISTIKA [6]). Проте застосування цих програмних засобів носить характер калькуляторного роз-

рахунку і не завжди зручне у методичному сенсі. Така незручність обумовлена тим, що науково-прикладних дослідженнях досить часто трапляються ситуації, коли визначення парних коефіцієнтів кореляції та коефіцієнта множинної кореляції необхідно провести в одному циклі для певної сукупності окремих наборів експериментальних даних із подальшим використанням у тому ж розрахунковому циклі цих статистичних параметрів для тих чи інших розрахунків. Саме з такою метою і було створено нами зазначене вище оригінальне комп'ютерно-програмне забезпечення. Наприклад, подібна ситуація мала місце у випадку досліджень, які проводилися роботах [2, 3]. В цих випадках було зручніше і доцільніше використати власне оригінальне програмне забезпечення. Зазначимо, що в процесі створення цього програмного забезпечення було проведено і його тестування. Для тестування були використані приведені у роботі [7] експериментальні дані та розраховані за ними коефіцієнти кореляції. За результатами тестування нашими програмними засобами були безпомилково відтворені значення коефіцієнти кореляції, отримані авторами цитованої вище роботи.

При розробці оригінального програмного забезпечення спрощеної процедури дослідження кореляційного взаємозв'язку використовувалося методично-аналітичне забезпечення, викладене в роботі [1]. В цій роботі для оцінки тісноти (або сили) зв'язку між випадковими величинами X та Y пропонується використовувати коефіцієнти кореляції. У випадку, коли між X та Y існує лінійний зв'язок та вибіркові дані розподілені за нормальним законом, коефіцієнт кореляції Пірсона розраховується за формулою:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{S_x S_y}, \quad (1)$$

де \bar{x} – вибіркове середнє величини X ; \bar{y} – вибіркове середнє величини Y ; \overline{xy} – вибіркове середнє величини XY ; S_x – вибіркове середнє квадратичне відхилення величини X ; S_y – вибіркове середнє квадратичне відхилення величини Y .

Для не згрупованих даних розрахункова формула (1) набуває наступного вигляду:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}. \quad (2)$$

У випадку, коли досліджуваний об'єкт або явище характеризується більш, ніж двома ознаками X_1, X_2, \dots, X_k необхідно вивчати множинні залежності. Для оцінки сили зв'язку між певною ознакою та усіма іншими ознаками використовують множинний коефіцієнт кореляції, для якого використовується позначення $R(y; x_1, x_2, \dots, x_k)$. Коефіцієнт множинної кореляції – це деяке число від 0 до 1, що характеризує тісноту лінійного кореляційного зв'язку між незалежними (x_1, x_2, \dots, x_k) і залежною (y) випадковими величинами [1].

Для розрахунку множинного коефіцієнта кореляції необхідно побудувати матрицю A парних коефіцієнтів кореляції $r_{ij}, i = 1, 2, \dots, k$ між ознаками X_i та X_j ,

$$A = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{kk} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

знайти визначник $|A|$ матриці A та алгебраїчне доповнення A_{11} елемента r_{11} цієї матриці. Розрахунок множинного коефіцієнта кореляції здійснюється за такою формулою:

$$R(y; x_1, x_2, \dots, x_k) = \sqrt{1 - \frac{A_{11}}{|A|}}. \quad (4)$$

У випадку матриці для обчислення визначника A_{11} , який також фігурує у формулі (1), то її отримують із матриці A шляхом викреслення в ній першої стрічки і першого рядка.

В якості апробації створене програмне забезпечення було використано при дослідженні кореляційного взаємозв'язку експлуатаційних показників шліфувальних кругів з технологічними властивостями модифікованих шліфпорошків синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору, використаних у різальному шарі такого інструменту. Результати цих досліджень були опубліковані в роботах [2, 3]. Застосування створеного програмного забезпечення в цих дослідженнях було зручним, корисним і успішним в методичному сенсі. Тому воно придатне для використання і в подальших дослідженнях, пов'язаних із кількісним аналізом кореляційного взаємозв'язку, зокрема в прикладних задачах інструментального матеріалознавства.

Література

1. Петасюк, Г. А., Лаврінченко, В. І., Полторацький, В. Г., Пасічний, О. О., Петасюк, О. У. Дослідження взаємозв'язку технологічних властиво-

стей модифікованих комбінованим покриттям шліфпорошків кубоніту з експлуатаційними характеристиками виготовлених з використанням таких порошків шліфувальних кругів // Надтверді матеріали. – 2024.– №6.

2. Полторацький, В. Г., Бочечка, О. О., Лавріненко, В. І., Петасюк, Г. А., Пасічний, О. О., Білоченко, В. П. Порошки синтетичного алмазу з модифікованою термостійкими оксидами і хлоридами поверхнею зерен: отримання, властивості, застосування // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – 2023. – Вип. 26. – Київ : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України. – С. 204–225.

3. Войналович, О. О., Камських, О. В. Дослідження залежності витрати алмазу від швидкості різання // Процеси механічної обробки, верстати та інструмент : зб. наук. праць X Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, 6–9 листопада 2019 р., м. Житомир. – Житомир, 2019. – С. 75–77.

4. Адлер, Ю. П., Маркова, Е. В., Грановский, Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

5. Перегуда, О. В., Капустян, О. А., Крилко, О. Б. Статистична обробка даних : навч. посіб. – Електронне видання. – 2022. – 103 с.

6. Майборода, Р. Є., Сугакова, О. В. Статистичний аналіз даних за допомогою пакету STATISTICA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://matphys.rpd.univ.kiev.ua/downloads/courses/mmatstat/StatAn.doc>

7. Дорбанд, В., Котцауэр, А., Кучке, К.-Х., Петрушка, К., Вебер, С. Програмування на ФОРТРАНЕ. Справочник / пер. з нім. Х. Н. Шаллагова ; ред. Е. А. Трахтенгерц. – М. : Статистика, 1973. – 96 с.

Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К. Національний транспортний університет, Київ
Будяк Р.В. Калинівський технологічний фаховий коледж, Вінницька область, Хмельницький район

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ

Високі експлуатаційні характеристики протяжного інструменту, зокрема параметри надійності (стійкість проти спрацювання в умовах абразивного зношування, опір адгезійним процесам в зоні контакту з оброблюваним матеріалом, опір руйнуванню від деформацій згину), а

також забезпечення потрібних геометричних та фізико-механічних характеристик поверхні деталі, визначаються правильним проектуванням робочої частини інструменту, яка виконує холодне пластичне деформування [1–4]. Розпочинаючи розробку інструменту, потрібно вірно вибрати пару ковзання: «оброблюваний матеріал (ОМ) – матеріал деформуючого елементу (ДЕ)». При виготовленні чи ремонті гільз із незагартованих легованих або конструкційних сталей найкращим інструментальним матеріалом є металокерамічні тверді сплави тих марок, які мають найліпше поєднання твердості та міцності (84–86 HRA при $\sigma_{zg} = 1,9\text{--}2,1$ ГПа) [3]. Наступним етапом проектування деформуючих елементів є визначення профілю робочої поверхні. При наскрізному внутрішньому ХДЗ інструментами з робочими елементами конічної форми при одноциклових деформаціях зі значеннями понад 1% епюра нормальних напружень уздовж лінії контакту завжди описується плоскою кривою з двома максимумами (на початку та в кінці останнього) та одним мінімумом, розміщеним приблизно посередині лінії контакту. При цьому найбільші значення напружень перевищують їх найменші величини в 1,5–3,0 рази, а границю текучості ОМ в 2,0–3,5 рази [2, 3]. Руйнування та найбільш інтенсивне зношування ДЕ відбувається саме на межах контакту, тобто в зонах обох максимумів кривої напружень. У той же час, в районі її мінімуму значення контактного тиску нерідко нижчі від величини границі текучості матеріалу деталі і, в окремих випадках, падають до нуля, що свідчить про виникнення двох окремих осередків пружно-пластичної деформації при роботі одного робочого елемента конічної форми. Отже, при розрахунках комбінованого інструменту призначеного для ХДП, недопустимо вважати нормальні напруження рівномірно розподіленими уздовж лінії контакту або замінювати їх зосередженою силою.

Найбільш суттєвий вплив на кривизну та розмах граничних значень епюри нормальних напружень має радіальна жорсткість деталей, зменшення якої спричинює зростання цих характеристик епюри. На величину максимальних значень нормальних напружень суттєво впливають властивості ОМ, у першу чергу границя текучості, а також кут твірної забірного конуса. При більших значеннях двох останніх характеристик спостерігаються більші величини напружень. Незначно змінюються абсолютні та відносні параметри епюри при змінах швидкості, масштабного фактору і марки мастила. Найбільш дієвим методом підвищення зносостійкості та несучої здатності інструменту, є надання його робочому профілю форми плоскої кривої, що корелює з епюрою нормальних напружень при роботі ДЕ конічної форми в таких

самих умовах. Цей метод дозволяє практично рівномірно розподілити нормальні напруження уздовж 90–95% фактичної довжини контакту, одночасно зменшивши їх в 1,5–2,5 рази порівняно з максимальними напруженнями для традиційної конструкції інструменту.

Таким чином, криволінійний профіль ДЕ порівняно з прямолінійним має наступні переваги. Довжина і, отже, площа контакту інструменту і заготовки у першому випадку на 20–40% більша, ніж у другому, тобто практично сягає розрахункових характеристик, оскільки передня позаконтактна зона ліквідується повністю, а задня значно зменшується. При криволінійному профілі ДЕ епюра нормальних навантажень (контактного тиску) має стабільний і рівномірний характер по всій довжині контакту. Ці дві обставини при розрахунках на міцність дозволяють замінити небезпечні «перерізуючі» радіальні сили, що діють на початку та у кінці контакту конічного ДЕ, на розподілене навантаження елемента з криволінійною поверхнею і, таким чином, запобігти руйнуванню інструмента від деформацій згину. І, нарешті, нова форма робочої частини дозволяє локалізувати хвилю позаконтактної деформації, зменшивши її параметри (довжину, висоту та відстань до максимуму) в 5–25 раз, і зосередити кільцеподібне джерело пластичної деформації виключно навпроти зони контакту з одночасним пониженням його напруженості. Це дозволяє суттєво поліпшити характеристики точності деталей за рахунок замикання «пластичного шарніра» на жорсткий інструмент, зменшення усадки і ліквідації розбивки отворів деталей завдяки локалізації пружної складової деформації. У більшості випадків це служить підставою для відмови від складних додаткових пристроїв для протягування і кінематичних схем процесу типу «на розтяг» та «з протинатягом».

Останнім етапом на шляху поліпшення експлуатаційних показників комбінованого протяжного інструмента є комплекс технологічних заходів, серед яких алмазно-абразивна обробка усіх поверхонь деформуючих елементів до шорсткості Ra 0,05–0,15.

Таким чином, найбільш дійовим методом підвищення зносостійкості та несучої здатності комбінованого протяжного інструменту, є надання його робочому профілю форми плоскої кривої, що корелює з епюрою нормальних напружень при роботі ДЕ конічної форми в таких самих умовах. Це дозволяє практично рівномірно розподілити нормальні напруження уздовж 90–95% фактичної довжини контакту, одночасно зменшивши їх у 1,5–2,5 рази порівняно з максимальними напруженнями для традиційної конструкції інструменту. В результаті, при розрахунках на міцність небезпечні «перерізуючі» радіальні сили,

що діють на початку та у кінці контакту конічного ДЕ, можна замінити на розподілене навантаження елемента з криволінійною поверхнею і, таким чином, запобігти руйнуванню інструмента від деформацій згину. Нова форма робочої частини дозволяє також локалізувати ХПД, зменшивши її параметри (довжину, висоту та відстань до максимуму) в 5–25 раз, і зосередити кільцеподібне джерело пластичної деформації виключно навпроти зони контакту з одночасним пониженням його напруженості. Це дозволяє суттєво поліпшити характеристики точності деталі за рахунок замикання «пластичного шарніра» на жорсткий інструмент, зменшення усадки і ліквідації розбивки отворів деталей завдяки локалізації пружної складової деформації.

Література

1. Інженерія деталей, оброблених протягуванням / Е. К. Посвятенко, Я. Б. Немировський, С. Є. Шейкін та ін. – Кропивницький : Вид-ць Лисенко В. Ф., 2021. – 466 с.
2. Посвятенко, Е. К., Мельник, О. В., Алексеев, В. В. Комбіновані методи інженерії поверхні деталей транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету. – Київ : НТУ, 2006. – Вип. 11. – С. 13–16.
3. Будяк, Р. В. Вдосконалення процесу механічної обробки гільз гідроциліндрів комбінованим протягуванням : дис. ... канд. техн. наук / Будяк Р. В. – Вінниця, 2014. – 145 с.
4. Посвятенко, Е. К., Иванов, Ю. М. Основи розрахунку комбінованого інструменту для процесів на базі протягування // Резание и инструмент в технологических системах. – 2001. – Вип. 59. – С. 171–175.

Рябченко С.В., Сільченко Я.Л., Федоренко В.Т.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Київ

ШЛІФУВАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ АБРАЗИВНИМИ КРУГАМИ ІЗ ЗОЛЬ-ГЕЛІЄВОГО КОРУНДУ

Шліфування деталей із загартованих сталей абразивними кругами є суттєвою проблемою. Щоб підвищити ефективність обробки деталей із загартованих сталей запропоновано замість абразивних кругів зі звичайного білого електрокорунду використовувати абразивні круги із золь-гелієвого корунду.

Досліджувався процес шліфування та працездатність чашкових абразивних кругів (типу Т6) діаметром 100 мм та висотою 40 мм, зернистістю F60 на керамічній зв'язці. Обробка загартованих сталей проведена в умовах торцевого шліфування на заточувально-шліфувальному верстаті ЗБ642 (рис. 1). При цьому режими шліфування були наступними: швидкість абразивного круга $v_{кр} = 15$ м/с; подовжена подача $S_{пр} = 2$ м/хв; поперечна подача $S_{поп} = 0,04$ мм/подв.хід. Шліфувалася торцева поверхня пластини розміром 120×30×5 мм із загартованої швидкорізальної сталі типу Р6М5 (60 HRC).



Рис. 1 – Шліфувальний круг із золь-гелієвого корунду

При дослідженні працездатності шліфувальних кругів контролювались:

- кількість зняття обробленого матеріалу (г);
- лінійний знос шліфувального круга (мкм);
- відносний знос круга на 1 г знятого матеріалу;
- потужність шліфування, $N_{сф}$ (Ват);
- шорсткість обробленої поверхні зразка Ra (мкм).

Результати дослідження процесу шліфування кругами із золь-гелієвого корунду показали, що обробка загартованої сталі Р6М5 ефективна в порівнянні з кругами із білого корунду. Шліфування кругами із золь-гелієвого корунду шліфують загартовану сталь рівномірно, без напруження, не «припікають» поверхню обробленого матеріалу та забезпечують меншу потужності шліфування і меншу шорсткість обробленої поверхні.

Результати показників працездатності шліфувальних кругів із золь-гелієвого корунду:

- зняття обробленого матеріалу – 25 г
- лінійний знос круга – 32 мкм;
- відносний знос круга $q = 6,4-9,6$ мкм/г
- потужність шліфування $N_{\text{еф}} = 150$ Ват
- шорсткість обробленої поверхні Ra 0,38.

Відносний знос круга на 1 грам знятого матеріалу розраховувався відносно лінійного зносу круга до кількості зняття обробленого матеріалу за період шліфування і складає від 6,4 мкм/г до 9,6 мкм/г. Потужність шліфування $N_{\text{еф}}$ визначалась різницею загальної потужності $N_{\text{заг}}$ та потужності холостого ходу $N_{\text{хх}}$. За весь період шліфування потужність $N_{\text{еф}}$ складала до 250 Ват.

Шорсткість обробленої поверхні замірялась вздовж торцевої поверхні шліфованого зразка та складала від Ra 0,38

Salenko O.F., Kostenko A.O. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
Orel V.M. State University "Zhytomyr Polytechnic", Zhytomyr
Habuzian H.V. Professional College of Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchug National University, Kremenchug, Ukraine
Swook Hann. Korea Photonics Technology Institute, Gwangju, South Korea

POST-TREATMENT AS A MEANS OF ENSURING FUNCTIONAL SURFACE PROPERTIES

Additive technologies, unlike substratif technologies, are increasingly used in engineering practice, as they have undeniable advantages:

- the ability to create complex spatial shapes of parts;
- unlimited interconnected surfaces with the formation of faces of the desired profile;
- wide technological capabilities;
- the ability to create thin shell products;
- the ability to create gradient structures;
- the formation of complex hollow structures and structural elements

That is why there has been an increase in interest in additive processes, in particular, FDM, SLS, SLA technologies, [1].

At the same time, additive products also have certain disadvantages, primarily related to the fact that the product ceases to be compact; the quality and strength of the connection of individual particles, fibers and layers are significantly influenced by thermal contact modes and force interaction schemes.

As a result, finished products are characterized by a certain anisotropy of properties (such anisotropy is especially significant for FDM processes, although these are currently the most accessible and low-cost technologies), as well as errors in shape and geometric dimensions, which in the vast majority of cases are determined by the conditions of product reproduction.

Post-processing of products obtained by additive processes is usually envisaged in the case when the product will subsequently be combined with other precise surfaces (with roughness parameters not worse than Ra 2.5 μm , IT qualities not worse than 7–9, as well as the thickness of the defective layer not more than 50–100 μm). The latter factor is tried to be reduced as much as possible, since the defective layer may have residual stresses, stress concentrators and centers of defect development (in particular, in the form of microcracks), which during operation can merge and cause the appearance of macrodefects.

Post-processing is performed by milling, drilling, grinding; less often, countersinks, special profile cutting tools are used.

Recently, more and more publications have appeared that cover post-processing by various physical and technical methods: laser beam, electron beam impact, hybrid action of mechanical, chemical, and thermal means. This allows not only to provide geometric parameters of conjugated or external surfaces, but also to change the structure, first, the density of surface and near-surface layers. Traditionally, during post-processing, not only the defective layer is reduced, but also the accuracy of the spatial arrangement of surfaces is increased, roughness is reduced, and the accuracy of the dimensions performed is increased.

The surfaces that are subjected to post-processing are flat and cylindrical, through and blind relative to the main reference planes and mating with other responsible surfaces.

The complexity of ensuring high quality and stable parameters of the surface layer lies in the fact that many defects are formed in the process of additive manufacturing. Thus, even for the simplest FDM technology, the variety of defects is significant, see Table 1.

The conditionality of the parameters of the surface layer, mechanical properties of the product is reflected in the cause-and-effect diagram, Fig. 1.

Table 1 – General classification of defects in products manufactured using FDM printing

Defect	Size	Spatial topology	Category	Location
Shrinkage	Centimeter	3D	Deformation	Combined
Distortion				
Layer displacement				
Delamination		2D		Surface/internal/combined
Twisting		3D		Combined
Voids	Centimeter/ millimeter	3D/4D	Deviation from the norm in the amount of material	Surface/internal/combined
Thread-like formations		1D		Superficial
Excessive extrusion	Millimeters	2D/3D		Surface/internal
Incomplete extrusion				
Fluctuations		3D	Superficial	
Cracks	Millimeters/ micrometers	1D/2D/4D	Deformation	Surface/internal
Drops		0D	Deviation from the norm in the amount of material	Superficial
Internal cavities	Micrometers/ nanometers	0D/4D	Deviation from the norm in the amount of material	Surface/internal

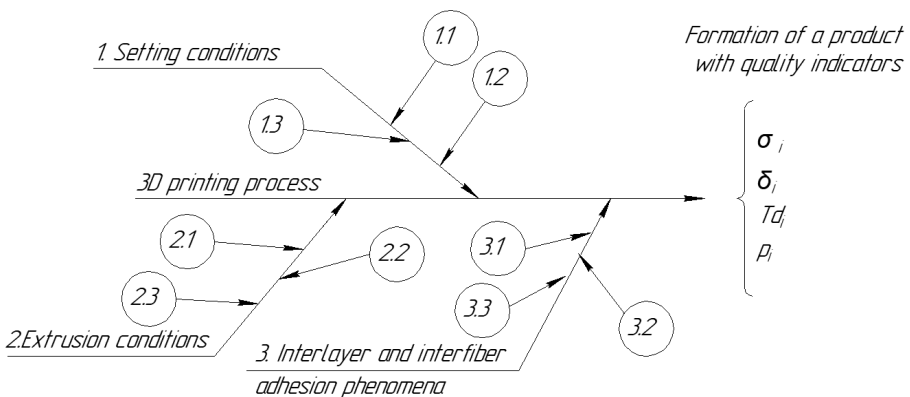


Fig. 1 – Cause-and-effect diagram showing the dependence of the initial properties of the product on the printing modes and dynamics of the printer used

In general, the cause-and-effect diagram of the formation of initial quality indicators is shown in Fig. 1. Defects can be conditionally divided into systemic (regular) and random; the latter can occur due to the following factors: 1) the presence of foreign impurities in the plastic, which partially clog the nozzle channel, which leads to insufficient plastic supply; 2) the formation of deposits inside the nozzle; 3) plastic slipping in the feed mechanism (for example, PETG or PE); 4) temporary deviations of printing parameters from the initial settings (for example, nozzle overheating or change in print speed).

Depending on the size, defects have varying degrees of influence on the properties of the product. These defects will also be determined by the post-processing tools that will be used in the future. Large defects can make the printed part completely unusable, significantly change the geometric shape or significantly reduce the mechanical properties. Small defects will not have such a significant impact on the properties of the part in the case of limited static loads, however, as shown in [2, 3], the action of thermobaric cyclic loads encourages even minor defects to actively develop until irreversible damage occurs, [4].

Having analyzed the conditionality of the surface layer parameters using a cause-and-effect diagram and having studied the features of the material structure of specific products (in particular, test ones), rational modes for post-processing of the most common PLA plastic were determined, which are given in Table 2 [5].

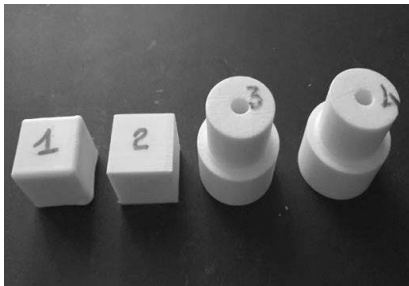

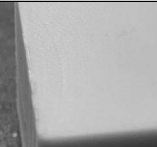
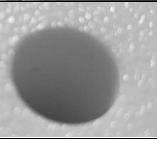
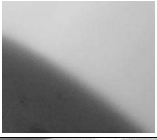
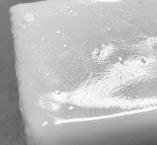


Fig. 2 – Test samples for post-processing

It was found that mechanical cutting satisfactorily removes the surface layer, but new defects in the form of cavities, delaminations and delaminations can be discovered; the products turned out to be quite sensitive to the accuracy of the cutting mode assignment. This can be explained by thermal phenomena occurring in the cutting zone: under certain circumstances, cutting begins to be accompanied by softening or complete melting of the area adjacent to the cutting zone; in the latter case, plastic inflows and the formation of individual craters associated with the adhesion of the material to the surface of the cutting wedge are observed. Laser processing, on the contrary, allows for intensive melting of the surface layer with the formation of a fairly high-quality surface with Ra 0.63–1.25. The thickness of the layer formed in this way is about 0.75–1.2 mm.

It was found that mechanical cutting satisfactorily removes the surface layer, but new defects in the form of cavities, delaminations and delaminations can be discovered; the products turned out to be quite sensitive to the accuracy of the cutting mode assignment. This can be explained by thermal phenomena occurring in the cutting zone: under certain circumstances, cutting begins to be accompanied by softening or complete melting of the area adjacent to the cutting zone; in the latter case, plastic inflows and the formation of individual craters associated with the adhesion of the material to the surface of the cutting wedge are observed. Laser processing, on the contrary, allows for intensive melting of the surface layer with the formation of a fairly high-quality surface with Ra 0.63–1.25. The thickness of the layer formed in this way is about 0.75–1.2 mm.

Table 2 – Post-processing options for additive products made from PLA

Process	Tool used	Cutting modes	Surface parameters	Photos
Turning	T15K6 through-type cutter	speed 570 rpm, feed rate 0.14 mm/rev cutting depth 0.2 mm	<i>Ra</i> 3,0–3,6 <i>Rz</i> 6,5–7,5	
Milling	End mill, 4 mechanical fastening plates, T15K6	Feed rate 71 mm/min 800 rpm milling modes cutting depth 0.2 mm	<i>Ra</i> 1,9–2,2 <i>Rz</i> 5,5–6,0	
Drilling	Drill bit <i>D</i> = 8.0 mm P6M5	570 rpm feed rate 5 mm/s	<i>Ra</i> 3,0–3,6 <i>Rz</i> 7,0–7,5	
Grinding	White electrocorundum 25 A, circle diameter 250 mm	Rotation frequency 3000 rpm Feed rate 10 mm/s	<i>Ra</i> 1,3–1,6 <i>Rz</i> 5,0–5,5	
Laser processing	Power – 25 W, wavelength 1062 nm, caustic overlay 0.25 mm	Scanning speed 800 mm/s, track overlap up to 25%		

Recommendations for post-processing: in general, they are similar to the processing of layered polymer composite materials, with a limitation of the force effect (cutting power). Processing should be performed with a cutting tool with a pointed wedge angles $\alpha = 5\text{--}120^\circ$, $\gamma = 10\text{--}150^\circ$, $\varphi = 30\text{--}450^\circ$. The use of sharply sharpened tools allows you to obtain a fairly high quality surface layer on PLA material: *Ra* 3.0–3.6, *Rz* 20–40 when turning, milling and drilling.

Further research should be aimed at establishing the conditionality of the surface parameters by the material used, its rheological properties.

Literature

1. Michael, K., Servos, M., Stief, P., Dantan, J., Etienne, A., & Siadat, A. (2018). On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.265>

2. Hashmi, A. W., Mali, H. S., & Meena, A. (2021). The Surface Quality Improvement Methods for FDM Printed Parts: A Review. In: Dave, H. K., & Davim, J. P. (Eds.), Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Cham: Springer. (Materials Forming, Machining and Tribology). https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_9

3. Ramesh, M., & Panneerselvam, K. (2020). Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM [Електронний ресурс]. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.697>

4. Salenko, O., Dzhulii, D., Drahobetskyi, V., Symonova, A., & Moloshtan, D. (2023). Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., & Edl, M. (Eds.), Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. Cham: Springer. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_27

5. Саленко, О., Орел, В., Габузян, Г., Костенко, А., & Цуркан, Д. (2023). Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів. Матеріали науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", (XXIII), 185–189. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278904>

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

ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ В ЧАСТИНІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

В умовах теперішнього економічного стану в країні і певному обмеженому фінансуванні придбання нового обладнання і устаткування не завжди представляється можливим. Із часом коли устаткування, зважаючи на свою зношеність або з інших причин, не відповідає встановленим до нього вимогам, а коштів на його заміну немає, – можливо провести його оновлення за рахунок дрібного, середнього або капітального ремонту будь-якого рівня складності. Такі роботи можуть бути досить ефективні й менш витратні у порівнянні з покупкою нового обладнання. Відновлення (реновація) обладнання з повною або частковою заміною комплектуючих, механічної, електричної частини тощо,

подальшим сервісним гарантійним та післягарантійним обслуговуванням, яке може включатися в себе регламентні роботи, дрібний ремонт, налаштування обладнання – підвищує його надійність, продуктивність і збільшує термін експлуатації.

Завданнями метрологічного забезпечення діяльності будь-якого підприємства є:

- підвищення якості продукції (послуг) і ефективності виробництва, використання матеріальних цінностей і енергетичних ресурсів;
- забезпечення достовірного обліку продукції, що випускається;
- забезпечення єдності вимірювань у певній сфері діяльності, встановлення раціональної номенклатури вимірюваних величин та розроблення методики виконання вимірювань для забезпечення встановлених норм точності;
- здійснення аналізу стану вимірювань на всіх стадіях розробки і виготовлення продукції (надання послуг);
- узагальнення результатів аналізу і оцінка стану засобів вимірювальної техніки, здійснення перевірки та калібрування засобів вимірювальної техніки, їх ремонту і використання, забезпечення єдності вимірювань для розроблення і виробництва продукції (надання послуг);
- визначення необхідної номенклатури засобів вимірювальної техніки і їх застосування з метою ефективного контролю технологічних процесів і характеристик готової продукції (послуг, що надаються);
- проведення моніторингу причин виготовлення неякісної продукції (надання неякісної послуги), що не відповідає метрологічним вимогам.

Мета метрологічного забезпечення – звести до раціонального мінімуму можливість ухвалення помилкових рішень за результатами вимірювань, випробувань і контролю сировини, матеріалів, виробів і процесів. Для досягнення цієї мети потрібне комплексне рішення усіх завдань метрологічного забезпечення.

Слід зауважити, що роботи з відновлення обладнання мають бути складовою частиною робіт загальної системи управління організації (підприємства) стосовно якості, зокрема щодо виробництва продукції.

Для належного розуміння та запровадження стандартів серії ISO 9000 щодо системи управління організації (підприємства) в Україні чинна низка національних стандартів, а саме:

ДСТУ ISO 9000:2015 (ISO 9000:2015, IDT) Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів.

Цей стандарт подає основоположні поняття, принципи та словник термінів стосовно систем управління якістю (далі – СУЯ) та забезпе-

чує основу для інших стандартів СУЯ. Цей стандарт має допомогти користувачеві зрозуміти основоположні поняття, принципи та терміни стосовно управління якістю з тим, щоб результативно та ефективно запровадити СУЯ і реалізувати цінність від інших стандартів СУЯ. Стандарт пропонує чітко визначену СУЯ, базовану на структурі, що об'єднує в собі встановлені основоположні поняття, принципи, процеси та ресурси, пов'язані з якістю, щоб допомогти організаціям реалізувати свої цілі. ДСТУ ISO 9000 застосовний до всіх організацій незалежно від їхнього розміру, складності чи бізнес-моделі. Ціль цього стандарту – збільшити обізнаність організації з її обов'язками та зобов'язанням щодо задоволення потреб і очікувань її замовників і зацікавлених сторін, а також щодо досягнення задоволеності її продукцією та послугами;

ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT) Системи управління якістю. Вимоги.

Запровадити СУЯ є стратегічним рішенням організації, яке може допомогти поліпшити її загальну дієвість та забезпечити міцну основу для ініціатив щодо сталого розвитку. Цей стандарт базовано на принципах управління якістю, описаних в ISO 9000. Описи охоплюють виклад кожного принципу, обґрунтування важливості принципу для організації, деякі приклади вигоди, пов'язані з принципом, а також приклади типових дій для поліпшування дієвості організації під час застосовування принципу. Потенційні вигоди для організації від запровадження СУЯ на основі цього стандарту такі: здатність постійно постачати продукцію та послуги, які задовольняють вимоги замовників, а також застосовні законодавчі та регламентовані вимоги; створення можливостей для підвищення задоволеності замовників; урахування ризиків і можливостей, пов'язаних із середовищем і цілями організації; здатність демонструвати відповідність установленим вимогам до СУЯ.

Цей стандарт спрямовано на забезпечення впевненості в продукції та послугах організації;

ДСТУ ISO/TS 9002:2017 (ISO/TS 9002:2016, IDT) Системи управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2015.

У цьому стандарті подано настанови щодо сенсу вимог ISO 9001:2015 з прикладами можливих кроків, які організація може зробити, щоб відповідати вимогам. Стандарт нічого не додає до цих вимог і нічого не віднімає від них чи в будь-який спосіб не змінює їх. Стандарт не встановлює обов'язкових підходів до запровадження чи не надає будь-якого переважного методу інтерпретації;

ДСТУ ISO 9004:2018 (ISO 9004:2018, IDT) Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху.

Цей стандарт зосереджений на забезпеченні впевненості у здатності організації досягти сталого успіху та спрямований на систематичне поліпшування загальної дієвості організації. Він охоплює планування, упровадження, аналізування, оцінювання та поліпшування результативної та ефективної системи управління. Поліпшування та інноваційна діяльність організації також підтримують сталий успіх. Цей стандарт сприяє забезпеченню інструмента самооцінювання для аналізування ступеня, до якого організація адаптувала положення, викладені в цьому стандарті.

Один із проголошених в ISO 9000 принципів керування стосується процесного підходу. Питання метрологічного забезпечення та процеси вимірювання треба розглядати як особливі процеси, спрямовані на підтримання забезпечення якості продукції організацією.

Результативна система керування (управління) вимірюванням, яка являє собою сукупність взаємопов'язаних або взаємодійних елементів, необхідних для забезпечення метрологічного підтвердження та постійного контролю процесів вимірювання, забезпечує придатність вимірювального обладнання та процесів вимірювання для використання за призначеністю й відіграє важливу роль у досягненні цілей щодо якості продукції та в керуванні ризиками отримання невірогідних результатів вимірювання. Призначеністю системи керування вимірюванням є керування ризиком того, що вимірювальне обладнання і процеси вимірювання могли б давати невірогідні результати, які негативно впливають на якість продукції організації. У системі керування вимірюванням використовують широкий діапазон методів: від перевіряння (верифікації) базового вимірювального обладнання до застосування статистичних методів у керуванні процесами вимірювання.

Національний стандарт ДСТУ ISO 10012:2005 (ISO 10012:2003, IDT) «Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання» містить як вимоги, так і настанови щодо запровадження систем керування вимірюванням, і може бути корисним у поліпшуванні вимірювальних дій і якості продукції. Настанова має лише інформаційний характер, її не треба тлумачити як таку, що доповнює, обмежує чи змінює будь-яку вимогу. Цей стандарт не призначено використовувати як необхідну умову демонстрування відповідності вимогам ISO 9001.

Організації зобов'язані визначити рівень потрібних заходів контролю і встановити вимоги системи керування вимірюванням, що їх

мають застосовувати як частину їхньої загальної системи управління. Стандарт ДСТУ ISO 10012 не призначений доповнювати, скорочувати чи замінювати будь-які вимоги інших стандартів, за винятком випадків, про які йдеться в окремих угодах. Дотримання вимог, викладених у цьому стандарті, спрощуватиме забезпечення відповідності вимогам до вимірювання та керування процесами вимірювання, встановленими в інших стандартах, наприклад в ISO 9001.

Цей стандарт установлює загальні вимоги і містить настанови щодо керування процесами вимірювання та метрологічного підтвердження придатності вимірювального обладнання, яке використовують для підтримання і демонстрування відповідності метрологічним вимогам. Він установлює вимоги щодо управління якістю системи керування вимірюванням, яку може використовувати організація, що виконує вимірювання як частину загальної системи управління і для забезпечення виконання метрологічних вимог. У стандарті ДСТУ ISO 10012 термін «процес вимірювання» використовують до операцій вимірювання (наприклад, під час проєктування, випробовування, вироблення, інспектування).

Під час проведення перевірок у сфері законодавчо регульованої метрології відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» одним із завдань є виконання вимог щодо наявності на підприємстві метрологічної служби або призначеної особи, відповідальної за забезпечення єдності вимірювання, положення про метрологічну службу, системи керування вимірюванням тощо.

Отже, для забезпечення робіт із відновлення (реновації) обладнання необхідно дотримуватися метрологічного забезпечення виробництва в цій частині. Метрологічне забезпечення виробництва охоплює всі стадії життєвого циклу продукції, починаючи з етапу науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт та закінчуючи виробництвом, яке охоплює комплекс організаційно-технічних заходів, що забезпечує визначення з потрібною точністю характеристик виробів, вузлів, деталей, матеріалів і сировини, параметрів технологічних процесів і обладнання та дає змогу досягти підвищення якості продукції і зниження невиробничих затрат на її розроблення та виробництво.

ЕФЕКТИВНИЙ ПРОЦЕС АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ ДІАМЕТРОМ ≤ 12 мм

Для алмазно-абразивної обробки керамічних куль з нітриду кремнію розглянуто переваги і недоліки виконання процесу з базуванням куль діаметром ≤ 12 мм на площині і у канавці V-подібного профілю за кругової подачі як за відсутності так і за наявності їхньої осциляції.

У переважній більшості випадків досягти високої точності форми керамічних куль алмазним шліфуванням важко, але використати його для надання заготовкам куль сферичної форми, яку уточнюють наступним алмазно-абразивним доведенням, є цілком логічним. Очевидно, що підвищення точності сферичної поверхні кулі шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на фінішну обробку виробу. Попередньо було встановлено, що при обробці заготовок розміром менше 12 мм пляма їхнього контакту з конусними поверхнями технологічного устаткування наближається до крайок останніх [1], тому внаслідок зниження контактної жорсткості й зношування конусних лез втрачається їхня основна функція утримувати вільно обертові кулі під час шліфування. Ці обставини спонукали нас дослідити чотири схеми базування куль (рис. 1): з базуванням на площину (рис. 1, а) і у кільцевій канавці (рис. 1, б) з круговою подачею без осциляції; з базуванням на площині (рис. 1, в) і у кільцевій канавці (рис. 1, г) з круговою подачею та наявності осциляції. Також досліджували вплив геометричних параметрів шліфування та режимів різання на показники процесу безперервного алмазного шліфування торцем круга керамічних куль діаметром ≤ 12 мм з нітриду кремнію. Показниками точності форми куль прийнято непостійність діаметра кулі $V_{D_{ws}}$ і форм-фактор круглограми кулі. Показниками форми поверхні алмазно-абразивного круга були кут нахилу робочої поверхні у радіальному напрямку λ і коефіцієнт кривизни k_p .

При шліфуванні керамічних куль з базуванням на одну точку й круговою подачею без осциляції куль показано [2], що за середнього значення непостійності діаметра куль $V_{D_{wL}} = 45,5$ мкм у проведених дослідках в обраних межах режимів обробки з підвищенням частоти обертання алмазного круга варіювання значення непостійності змен-

шилися до діапазону 27,7–38,1 мкм. Крім того існує область змінювання режимів, за яких значення форм-фактора круглограми куль є $f_r = 1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$, тобто відхилення профілю куль від сфери мінімальні. Розмах коливання координат лінії профілю алмазного круга знизився з 237 мкм до 158–162 мкм.

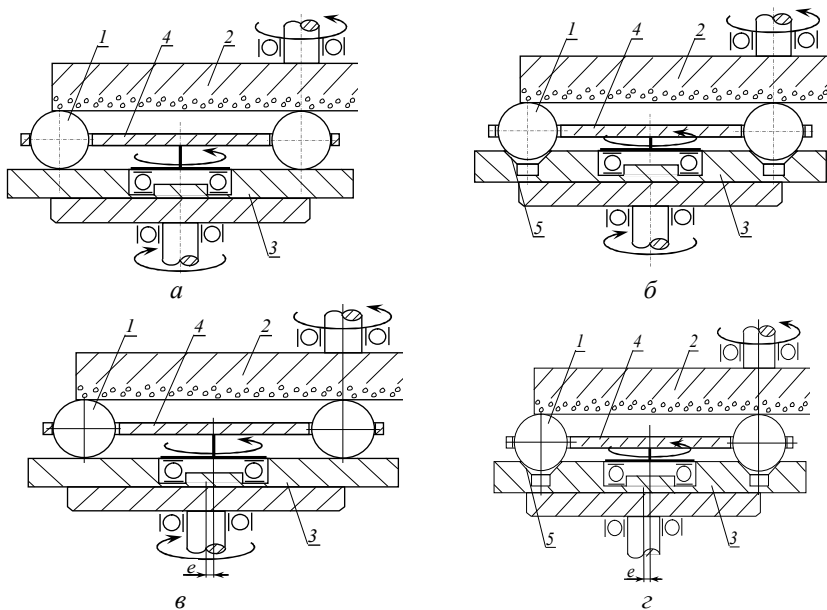


Рис. 1 — Способи алмазного шліфування керамічних куль з базуванням на площину (а) й у кільцеву канавку (б) з круговою подачею без осциляцій; з базуванням на площину (в) та у кільцевій канавці (г) з круговою подачею з осциляцією: 1 – оброблювані кулі; 2 – алмазний круг; 3 – обертовий стіл пристрою; 4 – сепаратор; 5 – планшайба.

При шліфування керамічних куль з базуванням на одну точку й круговою подачею, але з осциляцією куль, яка мала місце завдяки введенню ексцентриситету між осями обертання стола пристрою й сепаратора показало, що значення непостійності діаметра куль 25,9–28,5 мкм спостерігається при підвищенні частоти обертання алмазного круга і зниженні дискретної подачі [3]. Тут середнє значення непостійності виявилось $V_{DwL} = 38,0$ мкм. Треба зазначити, що існує область змінювання режимів обробки, за яких значення форм-фактора змінюються поблизу одиниці. При цьому, розмах коливання координат лінії профілю круга знаходився в межах 115–150 мкм. При шліфуванні куль з базуванням на одну точку й круговою подачею з

осциляцією куль досліджено вплив геометричних параметрів шліфування [4]: перекриття осі обертання круга окружностями розміщення куль – зовнішньою або внутрішньою, співвідношення кількості куль на зовнішній і внутрішній окружностях, ексцентриситету поля траєкторій куль відносно осі обертання круга. Показано, що за середнього значення $V_{DwL} = 25,0$ мкм менші значення $V_{DwLmin} = 16,9–21,7$ мкм спостерігалися за умови перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розміщення куль, співвідношення їхньої кількості 1,67 і наявності ексцентриситету поля траєкторій куль.

Загальним для розглянутих умов шліфування є, по-перше, неухильне зниження середнього значення V_{DwL} за подачі з осциляцією куль, якому сприяє також розосередження куль не лише на зовнішній окружності, але й залежно від радіуса розташування, а по-друге, неможливість змінити форму зношеної поверхні круга лише варіюванням режимів обробки.

Як показано у [5] за шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки й круговою подачею без осциляції куль має місце тенденція поступового переходу значень кута нахилу λ лінії профілю алмазного круга від від'ємних до додатних залежно від режимів обробки, тобто з'являється можливість впливати на форму круга змінюванням режимів шліфування. Отримані по ходу дослідів мінімальні значення кута нахилу λ ($-0,18651–0,38816$) зафіксовані за найбільшої кругової подачі куль, а значення кута λ поблизу нуля мають досягатися за одночасного певного підвищення технологічних режимів. Щоправда для наведеного діапазону змінювання λ значення коефіцієнта k_p від 0,00903 до $-0,01234$) є одними з найбільших за величиною. Розмах коливання координат лінії профілю круга знаходився в межах 62–152 мкм.

Треба зазначити, що при шліфуванні керамічних куль з базуванням на дві точки з круговою подачею і осциляцією [6] досягаються значення $V_{DwLmin} = 14,2–17,9$ мкм за середнього значення $V_{DwL} = 28,7$ мкм. Крім того, існує область змінювання режимів обробки, за яких значення форм-фактора змінюються поблизу одиниці і спостерігалася тенденція зменшення абсолютних значень кута нахилу λ , хоча й без зміни знаку; мінімальні значення λ від $-0,17094$ до $-0,19499$) досягаються при високих значеннях частоти кругової подачі. Має місце зменшення розмаху коливань координат профілю алмазного круга до 37–78 мкм – найнижчого показника серед досліджених умов шліфування.

З наведених результатів експериментальних досліджень очевидним є підвищення ефективності алмазного шліфування керамічних

куль за наявності їхньої осциляції – середні й мінімальні значення непостійності діаметра куль зменшуються, а значення форм-фактора за певних умов змінюються поблизу одиниці. Разом з тим кожна з досліджених схем базування куль має певні обмеження з точки зору збереження у межах можливого плоскої форми поверхні алмазного круга. Як уже згадувалося, за шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки й круговою подачею за наявності чи відсутності осциляції куль з'являється можливість до деякої міри впливати на форму круга змінюванням режимів шліфування.

Таким чином, із розглянутих нами схем базування найкращі результати зі зменшення непостійності діаметра куль до 15–21 мкм показує процес шліфування куль з базуванням останніх у канавці і круговій подачі з осциляцією при певних режимах обробки.

Однак через нерівномірне зношування у радіальному напрямку форма робочої поверхні алмазного круга залишається весь час увігнутою незалежно від варіювання режимами обробки. За досягнення вказаних значень непостійності діаметра куль кут нахилу лінії профілю у радіальному напрямку алмазного круга сягає значень від $-0,20128$ до $-0,30938$ рад [6]. Теж саме явище зі змінюванням форми круга з плоскої на увігнуту спостерігається під час округлення заготовок керамічних куль до сферичної форми алмазним шліфування за схеми їхнього базування на площині [2].

В цих умовах стає очевидною необхідність зміни умов шліфування таким чином, щоб повернути форму алмазного круга до плоскої або – враховуючи тенденцію змінювання цієї форми до увігнутої на етапі округлення заготовок керамічних куль – навіть забезпечити за певних умов випуклу форми з кутом нахилу лінії профілю наприклад не більше $+5^\circ$, щоб компенсувати у такий спосіб дію цієї тенденції на етапі досягнення вказаних значень непостійності діаметра куль.

Для цього після округлення заготовок слід скористатися налаштуваннями процесу шліфування керамічних куль з базуванням останніх у канавці й круговою подачею за відсутності їхньої осциляції з вибором мінімального значення кругової подачі куль в області налаштування, тобто застосовуючи режими обробки $\omega_k = 167,6 \text{ с}^{-1}$, $s_b = 0,03 \text{ мм/10 хв}$ і $\omega_3 = 1,8\text{--}22,0 \text{ с}^{-1}$.

Тож такі зміни у веденні процесу шліфування куль з метою усунення від'ємного кута нахилу лінії профілю круга можна зробити, поперше, після закінчення етапу округлення заготовок куль з їхнім базу-

ванням на площині, продовжуючи процес шліфування з базуванням куль вже у канавці й круговою подачею без осциляції, аж до переходу на етап досягнення потрібних мінімальних значень непостійності діаметра куль або, по-друге, після закінчення процесу шліфування чергової партії куль.

Таким чином запропонована концепція ефективності алмазно-абразивного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію дозволяє шляхом ведення процесу зі зміною налаштувань від схеми базування куль на площині на етапі округлення заготовок куль, продовжуючи процес шліфування з базуванням куль вже у канавці й круговою подачею без осциляції, застосовуючи також відповідні режими обробки з метою усунення увігнутості форми алмазного круга, й наступного переходу на етап досягнення потрібних мінімальних значень непостійності діаметра куль.

На основі проведених досліджень і з урахуванням особливостей процесу алмазно-абразивної обробки керамічних куль доведено доцільність шліфування куль з базуванням останніх у канавці з круговою подачею за відсутності їхньої осциляції і на певних режимах обробки для збереження плоскої форми алмазного круга або усунення увігнутості його поверхні. Запропоновано підвищити ефективність шліфування керамічних куль шляхом переходу на ведення процесу із зміною налаштування як схеми базування куль так і особливостей кругової подачі останніх, застосовуючи також відповідні режими обробки.

Література

1. Пасечний О. О. Алмазно-абразивна обробка деталей типу «шар» із конструкційної кераміки // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: у 6 т. / під заг. ред. Н. В. Новикова; НАН України, Ін-т надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля. – К. : ІСМ НАН України, 2007. – Т. 6 : Алмазно-абразивний інструмент у технологіях механообробки. – С. 340.

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

3. Sokhan' S. V., Voznyi V. V., Sorochenko V. G. Diamond grinding of ceramic balls based on a plane with circular feed under oscillation // Journal of Superhard Materials. – 2025. – Vol. 47, No. 1. – P. 54–66. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457625010101>

4. Сохань С. В., Возний В. В., Сороченко В. Г. Алмазне шліфування керамічних куль за змінювання геометричних параметрів процесу // Надтверді матеріали. – 2025. – Вип. 2. – С. 64–80.

5. Sokhan' S. V., Voznyi V. V., Sorochenko V. G., Hamaniuk M. P. Diamond Grinding of Ceramic Balls in an Annular Groove // Journal of Superhard Materials. – 2024. – Vol. 46, No. 2. – P. 143–153.

6. Сохань С. В., Возний В. В., Сороченко В. Г. Алмазне шліфування керамічних куль з базуванням у канавці й круговою подачею з коливанням // Надтверді матеріали. – 2025. – Вип. 4. – С. 76–91.

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

ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ДОВЕДЕННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ

Зважаючи на особливості процесу виготовлення керамічних куль з карбіду бору і нітриду кремнію [1] виконано експериментальне дослідження процесу алмазно-абразивного доведення керамічних куль з метою встановлення їх основних закономірностей змінювання показників алмазного доведення, які характеризують продуктивність і точність обробки, а саме: середній діаметр куль D_{omL} і різномірність діаметра кожної кулі у партії $V_{D_{omL}}$. Оскільки під час прецизійного алмазно-абразивного доведення керамічних куль вказані показники визначною мірою залежать від змінювання варіації діаметра кожної кулі, досліджували також закономірності змінювання останньої кулі у партії, а також швидкості змінювання зазначених показників. Дослідження проводили на технологічних стендах на базі доводочних верстатів мод. 3Е-814 при алмазно-абразивному доведенні керамічних куль $\varnothing 12,7$ мм з карбіду бора гарячого пресування V_4C (ГП), карбіду бору отриманого в апаратах високого тиску V_4C (АВТ) і нітриду кремнію отриманого в апаратах високого тиску Si_3N_4 (АВТ). Використовували послідовно пасти алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 28/20, 14/10, 2/1 і 1/0 на основі оливи індустріальної І-20А. Для фінішного доведення куль пасту алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 1/0 застосовували на технологічному сте-

нді на базі кульководочного верстата мод. ВШ-ДЗ. Доведення кульок здійснювали доти, поки не була виконана умова: варіація діаметра кожної кулі $V_{Dws} \leq 0,4$ мкм.

Результати досліджень представлено на рис. 1–10.

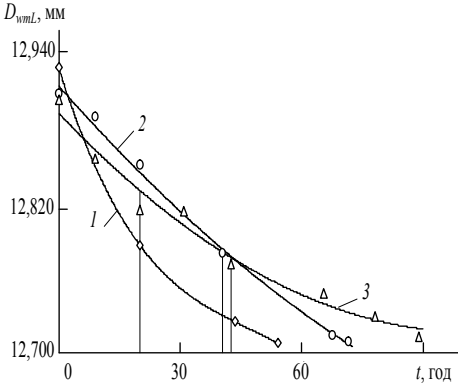


Рис. 1 – Залежність середнього діаметра куль у партії D_{wmL} від часу доведення пастами АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

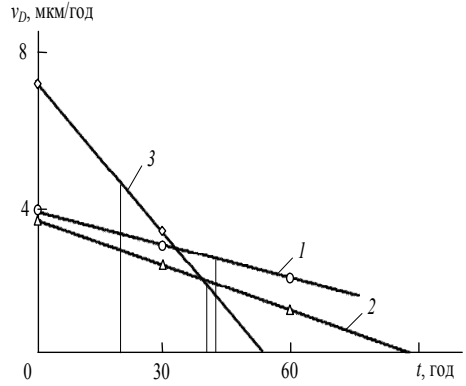


Рис. 2 – Залежність швидкості зменшення діаметра куль v_D від часу доведення пастами АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

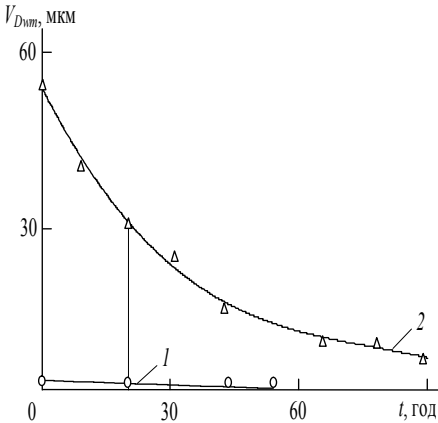


Рис. 3 – Залежність варіації діаметра партій куль V_{Dwm} від часу доведення пастами АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), Si_3N_4 (АВТ) (2)

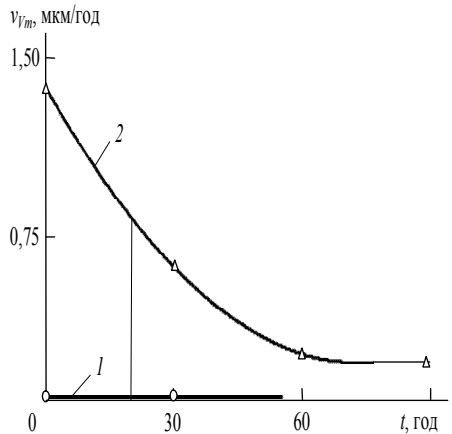


Рис. 4 – Залежність швидкості варіації діаметра партій куль v_{Vm} від часу доведення пастами АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), Si_3N_4 (АВТ) (2)

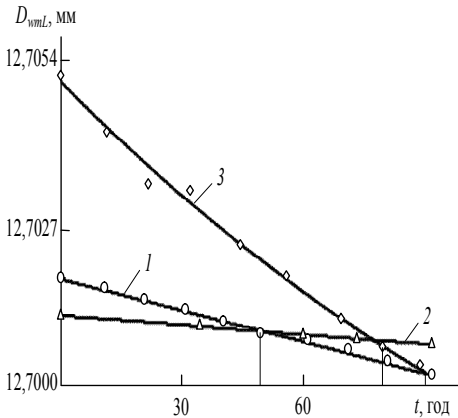


Рис. 5 – Залежність середнього діаметра куль у партії D_{wmL} від часу доведення пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

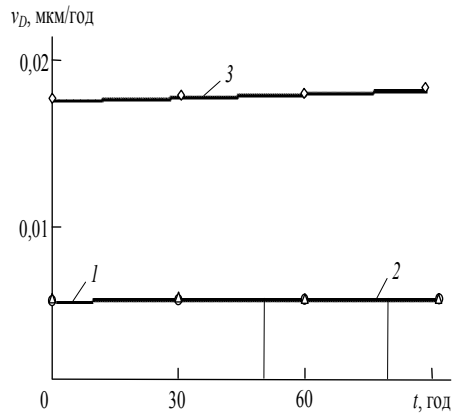


Рис. 6 – Залежність швидкості змінювання діаметра куль v_D від часу доведення пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

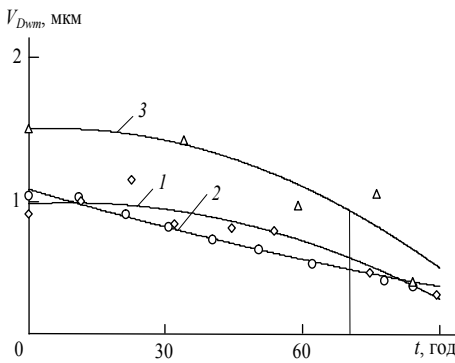


Рис. 7 – Залежність варіації діаметра партії куль V_{Dwm} від часу доведення пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

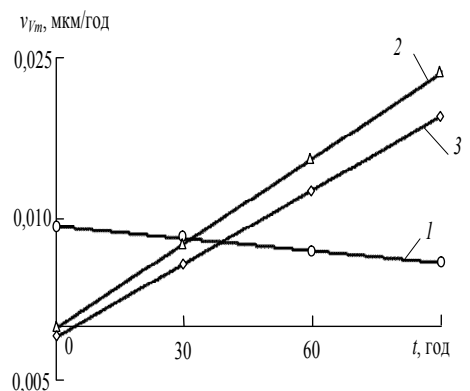


Рис. 8 – Залежність швидкості змінювання варіації діаметра партії куль v_{Vm} від часу алмазного доведення пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

На попередніх переходах алмазно-абразивного доведення (див. рис. 1–4) меншу зернистість паст (АСМ14/10 замість АСМ28/20) застосували для куль з V_4C (ГП) – на 38 год, V_4C (АВТ) – на 40,5 год, Si_3N_4 (АВТ) – на 20 год. На фінішних переходах доведення (див. рис. 5–10) меншу зернистість паст (АСМ 1/0 замість АСМ 2/1) засто-

сували для куль з V_4C (ГП) – на 79,5 год, V_4C (АВТ) – не застосовували, Si_3N_4 (АВТ) – на 51,5 год.

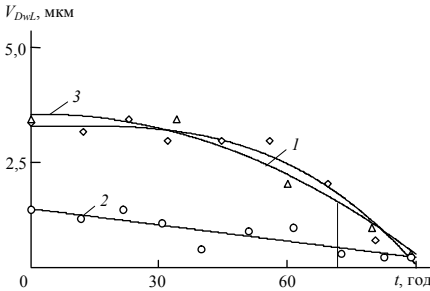


Рис. 9 – Залежність різнорозмірності діаметра куль у партії V_{DwL} від часу доведенні пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

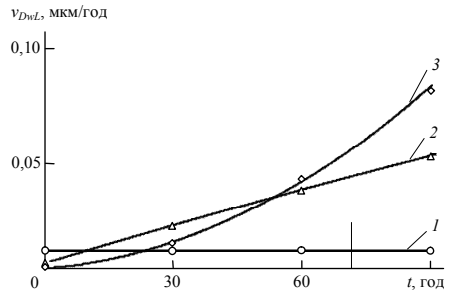


Рис. 10 – Залежність швидкості змінювання різнорозмірності діаметра куль у партії v_{DwL} від часу алмазного доведення пастами АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з V_4C (ГП) (1), V_4C (АВТ) (2), Si_3N_4 (АВТ) (3)

Як видно на рис. 1, 2 і 5, 6, незалежно від зернистості використаної пасти мікропорошку алмазу продуктивність доведення куль, отриманих методом спікання під тиском в АВТ з електронагрівом, є суттєво відмінною від такої для куль, отриманих традиційним методом гарячого пресування. А швидкості зменшення діаметра куль і змінювання варіації їх діаметра не співпадають (див. рис. 2 і 4, 6 і 8), що потрібно враховувати під час призначення припуску на доведення. Оскільки швидкості змінювання діаметра кульок і змінювання варіації їх діаметра не співпадають, мінімальний припуск $\Delta_{mL} = f(t_{\phi})$ на доведення пастами алмазного мікропорошку АСМ 2/1 і АСМ1/0 визначаються, спираючись на експериментальні закономірності зменшення діаметра куль від часу доведення (див. рис. 5). Методика призначення припуску на різних стадіях алмазно-абразивного доведення є наступною. Спираючись на встановлені експериментальні закономірності змінювання варіації діаметра партії куль V_{Dwm} від часу доведення пастами алмазного мікропорошку АСМ 2/1 і АСМ 1/0 (див. рис.7), вирішується зворотна задача визначення $t_{\phi} = f(V_{Dwm})$ для досягнення заданого значення V_{Dwm} .

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень встановлені основні фізичні закономірності змінювання показників алмазно-абразивного доведення керамічних кульок з карбіду бо-

ра і нітриду кремнію, відповідальних за продуктивність і точність механічної обробки. Отримано кількісну оцінку цих показників, на основі яких розроблено методику призначення припуску на різних стадіях алмазно-абразивного доведення залежно від заданого значення варіації діаметра куль.

Література

1. Сохань, С. В., Майстренко, А. Л., Возний, В. В., Сороченко, В. Г., Гаманюк, М. П., Зубанев, Є. М. Змінювання показників алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору й нітриду кремнію // Надтверді матеріали. – 2021. – № 2. – С. 72–82.

Тимофєєва Л.А., Баглай О.П., Назаренко М.Р.
Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

В умовах сучасного виробництва, зокрема у сфері зварювання та монтажу металевих конструкцій, існує потреба в точності, надійності і ефективності технологічних процесів. Більшої уваги потребують інформаційно-вимірювальні технології (ІВТ), які мають ключову роль у якості зварних з'єднань.

Одним із перспективних напрямів покращення ІВТ є інтеграція методів штучного інтелекту. Це пов'язано з потребою у більш лояльному, високоточному контролі параметрів зварювання в теперішньому часі.

Один із прогресивних напрямів розвитку ІВТ є використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ), а саме методів машинного навчання та глибокого аналізу даних. Інтелектуалізація ІВТ дає нові можливості для створення замкнутих контурів керування

Складність конструкцій та вимог до якості у сфері, як автомобілебудування, підтверджує актуальність теми, що указує, що лише зробивши аналіз значних обсягів даних є можливість досягти значного рівня точності виявлення дефектів.

Так от існуючі дослідження підтверджують високий попит на інтелектуалізацію інформаційно-вимірювальних систем у зварюванні,

що показує на потребу переосмислення підходів що до контролю якості технологічних процесів. Залишається мало дослідженим комплексний підхід до удосконалення ІВТ саме у контексті зварювання та монтажу металевих конструкцій. Із-за такої вади у науковій і прикладній площині визначає актуальність обраного напряму дослідження, яке направлене на обґрунтування та створення методів інтеграції штучного інтелекту в інформаційно-вимірювальні технології, при монтажних і зварювальних операціях із металевими конструкціями з урахуванням їх специфіки.

Література

1. Soto-Diaz, R., Vázquez-Carbonell, M., Escorcia-Gutierrez, J. A review of artificial intelligence techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2025. – Vol. 62. – Article 101949. – ISSN 2215-0986.

2. Kahnamouei, J. T., Moallem, M. Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review // *Ocean Engineering*. – 2024. – Vol. 312, Part 3. – Article 119294. – ISSN 0029-8018.

3. Luttmer, M., Weigold, M., Thaler, H., Dongus, J., Hopf, A. Towards data-driven quality monitoring for advanced metal inert gas welding processes in body-in-white // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2024. – Vol. 77. – С. 875–891. – ISSN 0278-6125.

Тимофесва Л.А., Гарбуз О.С., Харченко Б.-А.О.
Український державний університет залізничного
транспорту, Харків

ЗАХИСТ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИСКУ У ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У багатьох галузях промисловості, наприклад у нафтогазовій, хімічній, гірничій, існує підвищений ризик вибухів через наявність горючих газів, парів або пилу. У таких умовах будь-яке електричне або електронне обладнання, включаючи перетворювачі тиску, повинно бути спеціально спроектоване для роботи у вибухонебезпечних зонах.

З огляду на вимоги гармонізації законодавства України з нормами Європейського Союзу, зокрема Директиви 2014/34/EU (ATEX), виникає необхідність адаптації вимог до вибухозахищених приладів, включаючи перетворювачі тиску. Це дозволить забезпечити безпечну експлуатацію обладнання та його вихід на міжнародні ринки.

Основні принципи вибухозахисту базуються на кількох методах:

- використання іскробезпечного електричного ланцюга (Ex i) – обмеження енергії в електричних колах до рівнів, що не здатні викликати займання;
- використання вибухонепроникної оболонки (Ex d) — конструкція корпусу, що витримує внутрішній вибух без викиду полум'я;
- заливка компаундом (Ex m) – ізоляція елементів у спеціальній речовині, що унеможливило контакт з вибухонебезпечною атмосферою.

Класифікація вибухонебезпечних зон:

- Zone 0 – постійна наявність вибухонебезпечної атмосфери;
- Zone 1 – імовірна наявність під час нормальної роботи;
- Zone 2 – рідкісне виникнення короткотривалих вибухонебезпечних умов.

В ЄС діє Директива АТЕХ 2014/34/EU. Для перетворювачів тиску обов'язкова наявність:

- знака CE;
- позначки Ex із зазначенням категорії обладнання;
- номера органу сертифікації.

В Україні використовується гармонізований стандарт ДСТУ EN 60079. Водночас відчувається потреба в оновленні нормативної бази та посиленні контролю над сертифікацією обладнання, імпортованого або виготовленого в Україні.

Перетворювачі тиску у вибухонебезпечних середовищах повинні відповідати суворим вимогам безпеки. Вибухозахист таких пристроїв – це поєднання інженерних рішень, контролю якості та відповідності міжнародним стандартам. В умовах гармонізації з ЄС важливо враховувати вимоги АТЕХ та впроваджувати їх в нормативну базу України.

Література

1. ДСТУ EN 60079-0:2017. Вибухозахищене електрообладнання. Частина 0. Загальні вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 68 с.
2. ATEX Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council. – Brussels : European Union, 2014. – 45 p.

3. Єфремов, С. О. Технічні засоби вимірювання в промисловості / С. О. Єфремов. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 412 с.
4. Віткін, Л. І. Метрологія, стандартизація і сертифікація : навч. посіб. / Л. І. Віткін. – Київ : Центр навчальної літератури, 2010. – 352 с.
5. ISO/IEC 80079-34:2018. Explosive atmospheres – Application of quality systems. – Geneva : ISO, 2018. – 37 p.

Тимофєєв С.С., Волошин Д.І., Сергєєв О.В.
Український державний університет
залізничного транспорту, Харків

СУБМІКРОННІ МІКРОМЕТРИ У МЕТРОЛОГІЧНИХ ЛАБОРАТОРІЯХ: ВИКЛИКИ, РІШЕННЯ ТА КОНЦЕПЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ

Зародження концепції мікрометра як інструмента високої точності сягає кінця XVIII століття. Проте саме в XXI столітті цей прилад зазнав сутнісного перетворення – з механічного пристрою для макро- та мікрвимірювань він трансформувався у цифровий вузол з субмікронною дискретністю. Така трансформація стала наслідком одразу кількох незалежних трендів: мініатюризації елементів продукції (особливо в оптиці, біомедичних технологіях, авіакосмічному секторі), переходу до цифрових виробничих систем (Індустрія 4.0) та посилення ролі метрології як основи якості. Як наслідок, сучасна метрологічна лабораторія має справу не лише з перевіркою геометричних розмірів, але й з валідацією параметрів, що лежать на межі фізичних можливостей контактного вимірювання. Тут з'являються нові вимоги до вимірювального інструменту – зокрема до мікрометра, який тепер має демонструвати дискретність у межах 0,01 мкм при стабільності, властивій оптичним системам. На шляху до реалізації субмікронної точності виникає низка інженерних викликів. По-перше, усунення люфту в гвинтовій парі вимагає надпрецизійної обробки – на рівні допусків IT1–IT2, що значно перевищує можливості стандартного промислового обладнання. По-друге, вплив паразитних сил – тертя, бокового тиску, механічного імпульсу при контакті — стає критичним навіть у тих режимах, де раніше вважався несуттєвим. При субмікронних вимірюваннях похибка, викликана еластичним змінан-

ням поверхні або нерівномірним навантаженням п'ятки, може перевищити сам вимірюваний параметр.

Контактна деформація визначається класичною формулою Герца:

$$\delta = \left(\frac{3F(1-\nu^2)}{4ER} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

де F – сила контакту, E – модуль Юнга матеріалу, ν – коефіцієнт Пуассона, R – радіус п'ятки. При вимірюваннях полімерів або м'яких металів навіть зусилля у 1,5 Н може спричинити деформацію в межах 0,3–0,7 мкм. Тому стабілізація сили вимірювання — основа точності. Для цього в мікрометрах застосовуються магнітні муфти з постійним моментом, пневматичні компенсатори або пружинні блоки з електронним контролем.

Ще один фундаментальний параметр – відношення сигнал/шум (SNR), що характеризує чистоту вимірювального сигналу. Для цифрових мікрометрів з частотою зчитування >100 Гц і дискретністю 0,01 мкм, рівень SNR повинен перевищувати 60–70 дБ. Його обчислення базується на логарифмічному співвідношенні амплітуди сигналу до шуму:

$$SNR_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(A_{\text{сигнал}}/A_{\text{шум}}). \quad (2)$$

На практиці це означає, що навіть мікрівібрації фундаменту лабораторії, перемикання освітлення або близькість до джерел ЕМП (частотні приводи, мережеві адаптери) можуть призводити до втрати точності. З цією метою сучасні мікрометри обладнуються фільтрами Калмана, що реалізовані на мікроконтролерах, а також цифровими демпферами – алгоритмами експоненціального згладжування, які адаптивно знижують флуктуації. Щодо архітектури вимірювального вузла, тенденція йде в бік безконтактного або квазібезконтактного зчитування. Оптичні шкали (на основі фазового зсуву або голографічної інтерференції), індуктивні перетворювачі (LVDT) та лазерні енкодери замінюють традиційні гвинтові механізми. Це дозволяє зменшити інерцію системи, виключити теплові розширення при зчитуванні, а також реалізувати самодіагностику положення.

Нова функціональність – одна з найважливіших відмінностей субмікронного мікрометра нового покоління. До класичних вимірювань додаються:

- реєстрація дрейфу нульової позиції в часі;
- контроль стабільності під час реверсивного циклу;
- фіксація змін фрикційного моменту;

- цифрова трасовка етапів контакту (зростання сили, момент контакту, післяконтактна поведінка).

Ці дані дозволяють не лише виявляти похибки, а й прогнозувати їх, що відкриває можливості для вбудованої компенсації в режимі реального часу. Такі інструменти стають частиною так званої "інтелектуальної метрології", де прилад не лише вимірює, а й осмислює дані – фільтрує, аналізує, інтегрує в загальну базу вимірювальної системи. Зокрема, у рамках цифрових лабораторій сучасні мікрометри мають повну інтеграцію з системами типу LIMS (Laboratory Information Management System), CAQ (Computer-Aided Quality), ERP (Enterprise Resource Planning). Це означає, що кожне вимірне значення автоматично супроводжується цифровим підписом, калібрувальною історією, статистикою відхилень та параметрами самодіагностики. У перспективі такі системи будуть здатні до самокалібрування, прогнозного обслуговування та автономного прийняття метрологічних рішень. Усе це формує нову концепцію мікрометра – як інформаційного пристрою, що є частиною великої кіберфізичної екосистеми вимірювання. У цьому світі 0,1 мкм – це не похибка, а подія, що має технічне, статистичне та правове значення. Такий підхід зумовлює необхідність переосмислення класичних принципів метрології, де головними стали не тільки абсолютні значення, а й траєкторія їх формування.

Таким чином, субмікронний мікрометр – це не просто точний інструмент, а втілення нової ідеї інженерного контролю, у якому ключову роль відіграє інтелектуалізація вимірювального процесу. Це синтез традиційної прецизійної механіки, новітньої електроніки та алгоритмічного мислення, що відкриває шлях до вимірювань майбутнього – швидких, точних, адаптивних і достовірних.

Література

1. Smiljanić, I., Božović, I., Kačarević, G., Radulović, M., Stevanović, J. Metrology requirements for the integrated luminosity measurement using small-angle Bhabha scattering at ILC // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. – 2025.

2. Pedersen, A. P., Kellen, D., Mayo-Wilson, C., Davis-Stober, C. P., Dunn, J. C., Khan, M. A. та ін. Discourse on measurement // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. – 2025.

3. Johansson, P., Käll, M., Šípová, H. Depolarized Forward Light Scattering for Subnanometer Precision in Biomolecular Layer Analysis on Gold Nanorods // Journal of Physical Chemistry Letters. – 2025.

4. Wang, Y., Li, Z., Fayu, S., Li, F., Wang, W. Preparation of curcumin submicron particles by supercritical antisolvent method with external adjustable annular gap nozzle // Dental Science Reports. – 2025.

5. Ogawa, A., Enomoto, I., Takahashi, H. Micrometer-sized liposomes self-aggregate by forming DNA duplexes on their surfaces more sensitively than metallic nanoparticles // Chemistry Letters. – 2025.

6. Battaglia, F., Formenti, P., Giorio, C., Cazaunau, M., Pangui, E., Bergé, A. та ін. Formation and composition of organic aerosols from the uptake of glyoxal on natural mineral dust aerosols: a laboratory study // EGU sphere. – 2025.

7. Тимофєєв, С. С., Сергєєв, О. В., Рукавішников, П. В. Інноваційні підходи до калібрування метрологічного обладнання в умовах Індустрії 4.0: Використання штучного інтелекту та автоматизованих систем // Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика : матеріали 24-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (24–26 вересня 2024 р.). – Київ : АТМ України, 2024. – С. 133–135.

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

СИЛИ І ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ АУСТЕНІТНОГО ТА МАРТЕН- СИТНОГО СПЛАВУ NiTi

На сьогодні матеріали з ефектом пам'яті форми, зокрема сплави NiTi [1], викликають особливий інтерес завдяки широкому застосуванню в мікромеханіці, біомедицині та аерокосмічній галузі. Однак унаслідок високого деформаційного зміцнення, низької теплопровідності, великої питомої теплоємності та низького ефективного модуля пружності обробка цього матеріалу супроводжується значним зношуванням інструменту, підвищеними силами та температурами різання, ускладненим процесом стружкоутворення й стружковідведення, інтенсивним утворенням заусенців тощо [2, 3]. Зі зменшенням розмірів оброблюваних елементів проявляються масштабний ефект і ефект міні-

мальної товщини зрізу, які суттєво впливають на процес різання – зокрема, на величину питомої сили різання та температури в зоні обробки.

З метою порівняння сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi у різних фазових станах – аустенітному та мартенситному – було проведено скінченно-елементне моделювання (СЕМ) процесу різання у програмному середовищі DEFORM-3D [4]. Адекватність розробленої моделі підтверджено шляхом порівняння результатів моделювання із експериментальними даними, отриманими в [1].

Результати моделювання свідчать, що при мікрофрезеруванні аустенітного сплаву NiTi значення складових сил різання перевищують відповідні показники для мартенситного сплаву в середньому на 15% (рис. 1). Це пояснюється вищими значеннями твердості, модуля пружності та границі міцності аустенітного NiTi. При цьому максимальна температура різання для мартенситного NiTi є на 50% вищою, ніж для аустенітного, що зумовлено меншою теплопровідністю та теплоємністю мартенситної фази (рис. 2).

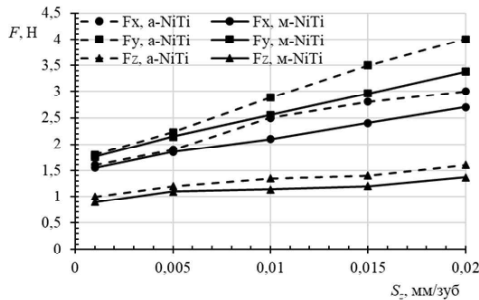


Рис. 1 – Сили різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплавів NiTi [4]

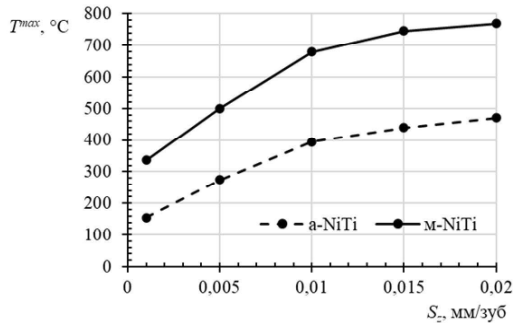


Рис. 2 – Залежність температури різання від подачі (час різання – 14 мс) [4]

Отримані результати сприяють глибшому розумінню особливостей процесу мікрофрезерування матеріалів на основі NiTi у різних фазових станах та можуть бути корисні для пошуку шляхів підвищення ефективності обробки цих матеріалів.

Література

1. Balytska, N., Tomashevskiy, O., Shadura, V. Evaluation of Cutting Forces and Temperatures in Micro-Milling of NiTi Alloys Using Finite Element Modeling // Journal of Engineering Sciences. – 2025. – Vol. 12, no. 1. – P. A20–A27. – DOI: 10.21272/jes.2025.12(1).a3.
2. Kaya, E., Kaya, İ. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 100, no. 5-8. – P. 2045–2087. – DOI: 10.1007/s00170-018-2818-8.
3. Томашевський, О. О., Балицька, Н. О., Прилипко, О. І. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу // Технічна інженерія. – 2024. – № 1(93). – С. 81–88. – DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-81-88.
4. Балицька, Н. О., Томашевський, О. О. Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – № 351(3(1)). – С. 35–43. – DOI: 10.31891/2307-5732-2025-351-4.

Хворостяний В.В., Долгов М.А., Бодунов В.Є. Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України
Цисар М.О. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Немерцева Н.В. ТОВ «СНОК ЛТД», Київ

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ВИПРОБУВАНЬ В УМОВАХ ЗГИНУ З ПОДВІЙНИМ СПІВВІСНИМ КІЛЬЦЕМ ПЛОСКИХ ЗРАЗКІВ ФЛОАТ-СКЛА

Міцність зразків та елементів конструкцій зі скла є визначальною характеристикою, що обумовлює їх несівну здатність і ресурс в умовах складних та екстремальних навантажень. Експериментальні мето-

ди досліджень скла передбачають проведення різних видів випробувань. Однак висока чутливість скла до концентрації напружень разом з відомими методичними труднощами виконання якісного дослідження обмежують практичне застосування деяких видів випробувань [1]. Водночас як і в науково-дослідних роботах у лабораторних умовах, так й під час контрольно-атестаційних заходах безпосередньо на виробництві, найбільш інформативними і поширеними можуть вважатися випробування скляних зразків на поперечний згин зосередженим навантаженням, чотирьох-точковий (чистий) згин та осесиметричний згин пластин, розташованих між співвісними кільцевими пуансонами. Останній із перерахованих методів дозволяє одержувати значення відносної міцності скла, яку слід розглядати для порівняльної оцінки міцності плоского зразка при згині [2]. Важливою особливістю та перевагою цього методу є те, що в досліді нівелюється вплив кромки з їм притаманною дефектністю, пов'язаною з операціями вирізання та механічної обробки зразків. Міцність скла визначається за експериментальних умов, за якими у робочій області під навантажувальним кільцем утворюється однорідний двовісний напружений стан, а напрямок та орієнтація статистично розподілених дефектів на цій напруженій площі поверхні не впливає на результат [3]. За даними таких випробувань може бути виконане порівняння ефективності застосування різних технологій поверхневого зміцнення скла, таких як загартування, хімічне травлення, іонний обмін та комбінації зазначених операцій. Власне самі експериментальні результати, що відображають технічну міцність скла з певним типом механічної обробки поверхні, мають велике значення для розв'язання проблем роботоздатності різноманітних технічних виробів, деталей машин та конструкцій зі скла, що використовуються у багатьох галузях промисловості, передусім на будівництві, транспорті, у машинобудуванні, авіа-космічній галузі та військово-промисловому комплексі.

Мета наведеного дослідження полягала в обґрунтованому виборі параметрів випробувань на згин із використанням співвісних кілець на зразках флоат-скла у вигляді плоских пластин із проміжними розмірами відносно тих, що визначені у відповідних міжнародних нормативних документах.

В експериментальному методі досліджуваній зразок плоского листового скла квадратної форми встановлювався на опорне кільце, а розташований над ним співвісно навантажувальний кільцевий пуансон забезпечував прикладення навантаження до досягнення руйнівного зу-

силля. Границю міцності за даних умов випробувань визначали за наступним виразом [4]:

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi \cdot h^2} \left[(1-\mu) \frac{a^2 - r_0^2}{2a^2} \cdot \frac{a^2}{b^2} + (1+\mu) \ln \left(\frac{a}{r_0} \right) \right], \quad (1)$$

де P – навантаження руйнування, h – товщина пластини, μ – коефіцієнт Пуассона, a – радіус опорного кільця, r_0 – радіус кільцевого пуансона, який навантажується, b – радіус круга, який дорівнює характеристичному розміру квадратної пластини.

Однак придатність цієї формули з можливістю одержання достовірних визначень міцності залежить від низки вимог і передусім від дотримання співвідношень між товщиною зразка, довжиною його сторони та розмірами застосованих коаксіальних опорних і навантажувальних кілець.

Вихідними даними були геометричні розміри квадратних зразків з номінальною товщиною h в діапазоні 2–12 мм та довжиною сторони $2b'$ в межах 40–240 мм. В такому випадку виконувалася рекомендована в [4] прийнятна відповідність розмірів, що виражалася як $2b' = 20h$. Необхідна умова полягала в тому, що радіус навантажувального кільцевого пуансона був не менше ніж 1,7 товщини зразка, для чого достатньо прийняти $r_0 = 2h$.

Наступна важлива вимога стосувалася обмеження впливу крайових ефектів на величину міцності та мала на увазі потребу щоб довжина сторони пластини була дещо більшою за розмір опорного кільця. Це досягалось при дотриманні умови, що $(b' - a) \geq 6h$. На рис. 1 показано, що для співвідношення коаксіальних опорних і навантажувальних кілець $(a/r_0) = 2$ ця умова виконується і міцність не залежить від стану кромки. Водночас множник (a^2/b^2) у формулі (1) враховує жорсткість консольної частини пластини, що у підсумку важливо для отримання достовірних результатів міцності скла в умовах осесиметричного згину [4].

Вибір розмірів кілець залежить від їх відповідності товщині випробовуваного зразка для забезпечення допустимого діапазону прогину в його центральній частині. Тому згідно з положеннями теорії пружності (лінійної теорії згину) накладається вимога, що обмежує величину прогину зразка в половину його товщини ($f \leq 0,5h$). Для наведених в табл. 1 емпіричних параметрів випробувань методом згину з подвійним співвісним кільцем всі зазначені умови переважно узгоджуються навіть для зміцнених стекел [4].

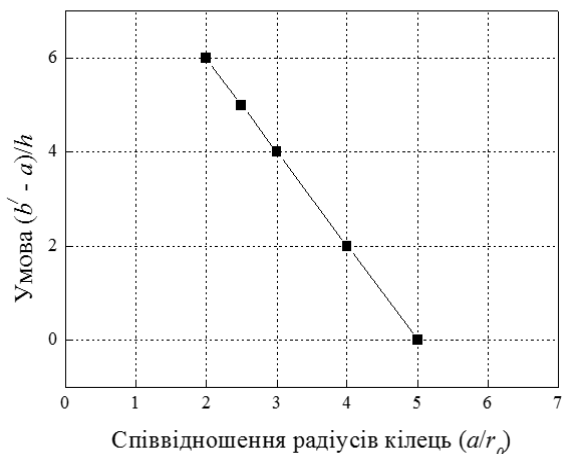


Рис. 1 – Перевірка умови виключення впливу дефектів кромки на міцність скла

Таблиця 1 – Розміри зразків та випробувальних кільцевих пуансонів

Товщина зразка, h , мм	Довжина сторони зразка $2b'$, мм	Радіус опорного кільця a , мм	Радіус навантажувального кільця r_0 , мм
2	40	8	4
3	60	12	6
4	80	16	8
5	100	20	10
6	120	24	12
8	160	32	16
10	200	40	20
12	240	48	24

Обґрунтований вибір розмірів коаксіальних опорних і навантажувальних кілець, що застосовуються під час експериментальних досліджень з визначення міцності в умовах осесиметричного згину плоских зразків флюат-скла у вихідному стані або з різними модифікаціями їх поверхонь, є запорукою визначення механізмів руйнування скла, дослідження впливу технологічних та експлуатаційних факторів, а також прояву масштабного ефекту.

Література

1. Солнцев, С. С. Разрушение стекла / С. С. Солнцев, Е. М. Морозов. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

2. EN ISO 1288-5:2022. Glass in building. Determination of the bending strength of glass – Part 5: Coaxial double-ring test on flat specimens with small test surface areas, BSI, UK (2022).

3. ДСТУ EN 1288-1:2022. Скло у будівництві. Визначення міцності скла на вигин. Частина 1. Основи випробування скла (EN 1288-1:2000, IDT), ДП «УкрНДНЦ» (2022).

4. Витман, Ф.Ф. О методе определения прочности листовых стекол / Ф.Ф. Витман, В.П. Пух // Заводская лаборатория. – 1963. – № 7. – С. 863 – 867.

*Цисар М.О., Псярнецька Т.О., Косенчук Т.О.,
Панасюк Т.С. Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ*

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ПРУЖНОСТІ АЛМАЗІВ ТИПУ ІЬ ОКТАЕДРИЧНОГО ГАБІТУСУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У ЯКОСТІ РІЗУЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ГЕОЛОГОРОВІДУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Закон пружного деформування металів вперше були вивчені англійським науковцем Р. Гуком (1672 р.). Однак Гук дав лише концептуальне уявлення про фізичний процес. Постулат Гука зазначав: пружна деформація – це зворотня зміна форми та розмірів тіла, котре виникає в наслідок зворотного зміщення атомів з положення рівноваги. Таким чином пружна деформація існує лише під час прикладання зовнішнього зусилля. Інший англійський науковець Т. Юнг надав математичну інтерпретацію цього закону, згідно якої напруження пружної зони прямопропорційне величині пружних деформації. Закон Гука в загальному вигляді для анізотропного тіла має вигляд [1]:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (1)$$

де ε_{ij} – деформація, σ_{kl} – напруження, S_{ijkl} – константа податливості кристалу.

Юнгом було доведено, що закон Гука є справедливим не лише при розтягу, але і при крученні, стиску та зсуві.

Малі розміри кристалів алмазу, їх висока твердість та крихкість не дозволяє виготовляти зразки згідно ДСТУ. Крім того деякі дослідження показали, що механічна обробка монокристалів алмазу призводить до зниження характеристик міцності. Тому на стиск випробовують криста-

ли неправильної огранки, також навіть кристали з однієї партії можуть мати відмінну одну від одного дефектність. Тому попередньо необхідно проводити сортування: за дефектністю та габітусною формою.

Розміри та співвідношення між розмірами дослідних зразків для механічних випробувань можуть бути самі різноманітні. Крім ДСТУ є також внутрішні СТП науково-дослідних установ. Однак в ДСТУ зазначено, що для уніфікації досліджень механічних характеристик, яку спрямовано на досягнення повторюваності результатів не залежно від місця проведення дослідження, складу робочої групи і т.д. необхідно виготовляти зразки однакові за розміром. Контроль виконується за такими розмірами: l – довжина робочої частини, або h – висота зразку при дослідженні на стиск; S – площа поперечного перетину робочої зони. Вимірювання цих величин здійснюється за допомогою цифрового штангенциркуля з точністю до другого знаку після зап'ятої, похибка вимірювання $\pm 0,01$ мкм. Це свідчить про важливість контролю геометричних розмірів макрозразків. Контроль геометрії мікрозразків здійснюється за допомогою відповідних оптичних приладів, що оснащені мірною сіткою, лінійкою, цифровою камерою і т.д., визначаються з точністю до третього знаку після зап'ятої з похибкою $\pm 0,002$ мкм. Також, слід відзначити, що у випадку коли неможливо виготовити зразок певної геометричної форми, наприклад, при дослідженні міцності ґрунтів, враховується відхилення від заданої геометрії за допомогою поправочних коефіцієнтів.

Використовуючи ці відомості нами було сформульовано математичний апарат перерахунку напружень та деформації. Так напруження визначаються згідно формули:

$$\sigma_R = K_s K_\gamma K_\phi (P_{кр}/F_{пр}), \quad (2)$$

де $P_{кр}$ – зусилля при якому відбувається руйнування, $F_{пр}$ – площа зони перекриття, K_s , K_γ , K_ϕ – коефіцієнти форми кристалу.

Деформації визначаються згідно співвідношення:

$$E = h/\Delta h, \quad (3)$$

де h – висота кристалу (відстань між опорною та гранню прикладання зусилля), Δh – зменшення висоти в процесі стиску (визначається за переміщенням траверзи).

Оскільки алмаз є крихким матеріалом тому він не має характерної зони так званої текучості, тому границю пружності за діаграмою (див. рис. 1) визначають умовно. Аналіз діаграм стиску, що записується, з високою точністю вимірювання переміщень свідчить про те, що для

ряду монокристалів (кам'яна сіль, квасци, кварц) відхилення від закону Гука – прямої, може наступати досить швидко.

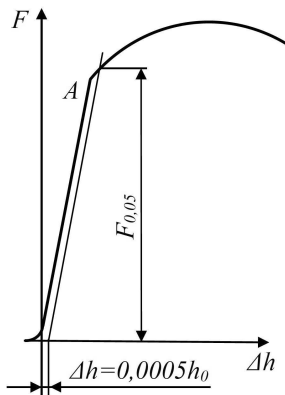


Рис. 1 – Схематичне представлення діаграми деформування крихкого матеріалу в пружній зоні

Порядок визначення границі пружності $\sigma_{0,05}$:

- на довільній частини пружної ділянки будуємо пряму з нахилом до осі абсцис;
- на осі абсцис відкладаємо точку що відповідає 0,05% залишкових деформацій відносно робочої висоти зразка;
- крізь цю точку проводимо пряму паралельну прямій з першого пункту;
- ордината точки A перетину із кривою є тим самим навантаження $F_{0,05}$ ($F_{пр}$). Границя пружності визначається згідно формули (2).

Дослідження проводились на групі, що складалась з п'яти монокристалів типу Ib октаедричного габітусу. Перевагою таких кристалів є в тому, що незалежно від розташування алмазу між опорною та поверхнею прикладання зусилля, стискуюче навантаження буде діяти в кристалографічному напрямку [111], це дає змогу виключити анізотропію пов'язану із фактором орієнтації. Протилежні грані таких кристалів мають ідеальну плоскопаралельність та не потребують додаткової обробки. Результати відповідних розрахунків за формулою (2) при коефіцієнтах форми прирівняних до 1 наведено в табл. 1.

**Таблиця 1 –Значення границі пружності монокристалів типу Ib
октаедричного габітусу**

№	$\sigma_{0,05}$, ГПа
1	3,64
2	5,03
3	4,54
4	4,82
5	5,02
Середнє	3,86
Розкид	0,45
Дисперсія	0,08

Як можна побачити з даних табл. 1, середнє значення міцності складає 3,86 ГПа, співвідношення границі міцності та границі пружності показує, що величина пружного відновлення складає 83,19%. Натомість експерименти з мікро- та наноіндентування свідчать про те, що пружне відновлення відбитку може складати 92,26%. Такий високий рівень границі пружності свідчить про високу зносостійкість бурового інструменту інкрустованого ріжучими вставками з монокристалів синтетичного алмазу.

Література

1. Новиков, Н. В., Кочержинский, Ю. А., Шульман, Л. А. та ін. Физические свойства алмаза: справочник / Н. В. Новиков, Ю. А. Кочержинский, Л. А. Шульман [и др.]; под ред. Н. В. Новикова. – Київ : Наукова думка, 1987. – 189 с.
2. Трощенко, В. Т., Грязнов, Б. А., Стрижало, В. А. та ін. Методы исследования сопротивления металлов деформированию и разрушению при циклическом нагружении / В. Т. Трощенко, Б. А. Грязнов, В. А. Стрижало и др. – Київ : Наукова думка, 1981. – Т. 1. – 344 с.
3. Писаренко, Г. С., Квітка, О. Л., Уманський, Е. С. Опір матеріалів: Підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.

ЗМІСТ

<i>Аврамчук С.К., Волкогон В.М., Кравчук А.В.</i> СУЧАСНА МЕТОДОЛОГІЯ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА	3
<i>Балицька Н.О.</i> ЗМОЧУВАНІСТЬ ФРЕЗЕРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВУ NiTi	5
<i>Бурикін В.В., Мановицький О.С.</i> ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ У ВИРОБАХ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	6
<i>Бутенко В.М., Чуб С.Г.</i> ПОКРАЩЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ МАШИНАМИ РЕМОНТНОГО ВИРОБНИЦТВА МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ	9
<i>Вислоух С.П., Волошко О.В., Юрковець В.І.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОСДНАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ	12
<i>Волошина Л.В., Роценко О.В., Шипіло Р.Г.</i> РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ЛІНІЙНО-КУТОВИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	16
<i>Гнатенко І.О., Андрєєв І.В.</i> ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧОГО МЕТАЛУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОЛЬФРАМОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ	18
<i>Даниленко Ю.А., Сараєва В.А.</i> ЯК ПРАЦЮВАТИМУТЬ ТК ЗА НОВИМИ ПРАВИЛАМИ: КЛЮЧОВІ ЗМІНИ У ДСТУ 1.14:2024	20
<i>Клименко С.А., Манохін А.С., Клименко С.Ан., Чумак А.О., Мельничук Ю.О., Копейкіна М.Ю., Найдєнко А.Г., Филипович А.С.</i> КОМПЗИТИ ІЗ ПОРОШКІВ cBN З ПОКРИТТЯМ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	23
<i>Клименко С.Ан., Манохін А.С., Чумак А.О., Клименко С.А., Мельничук Ю.О., Zhang Hao, Stelmakh O.U.</i> ЗНОС ІНСТРУМЕНТУ З PcbN ПРИ ТОЧІННІ СТАЛЕЙ ВИСОКОЇ ТВЕРДОСТІ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	25

<i>Клименко С.Ан., Чумак А.О., Манохін А.С., Клименко С.А., Рижов Ю.Е., Копейкіна М.Ю., Найдено А.Г.</i> ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ (ОГЛЯД)	28
<i>Комарова Г.Л., Хайнський Є.В., Лалазарова Н.О.</i> ІНЖЕНЕРІЯ ЯКОСТІ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	30
<i>Кузін О.А., Копилов В.І., Петренко В.В., Кузін М.О.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕТАЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ І ЗВАРЮВАННІ	33
<i>Куць Н.Г., Добровольська Л.Н.</i> НАНОІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ НА ТРАНСПОРТІ	36
<i>Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д., Смоквіна В.В., Логінова О.Б., Зайцева І.М., Тимошенко В.В., Діюк В.Є.</i> ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗУ	38
<i>Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Полторацький В.Г., Петасюк Г.А., Ситник Б.В., Солод В.Ю., Музичка В.А.</i> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В НАПРЯМКУ ЗАСТОСУВАННЯ КАРБІДНИХ ПОКРИТТІВ НА АЛМАЗНИХ ЗЕРНАХ	41
<i>Лавріненко В.І., Смоквіна В.В., Ільницька Г.Д., Скрябін В.О., Бологов П.І., Кошкін О.М., Солод В.Ю., Проц Л.А.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЛМАЗНОГО ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗІВ АДГЕЗІЙНО-МАГНІТНИМ СОРТУВАННЯМ В РІДИНІ	45
<i>Ланкін Ю.М., Семікін В.Ф., Байштрук Є.М., Романова І.Ю., Рибницька І.О., Страшко Р.В.</i> ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ З РЕГУЛЯТОРОМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ/СТРУМУ	49
<i>Логінова Ю.В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЯКОСТІ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	50
<i>Лопата Л.А., Буйських К.П., Лопата О.В., Солових А.Є.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ	54

<i>Лопата В.М., Качинська І.Р., Черновол М.І., Катеринич С.Є.</i> ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ СКЛОЕМАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ	58
<i>Лупкін Б.В., Андреев О.В., Andrzej Dzierwa, Антонюк В.С., Вислоух С.П., Волошко О.В.</i> ОЦІНКА ОБРОБЛЮВАНOSTІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МАРКИ АL-БОР В ПРОЦЕСІ РОЗРІЗАННЯ	62
<i>Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А., Базалій Г.А., Заболотний С.Д., Сизоненко О.М., Рудь В.Д., Циба М.М.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ СПОСОБОМ ІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ РОЗРЯДАМИ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	67
<i>Петасюк Г.А., Петасюк О.У.</i> ОРИГІНАЛЬНЕ МЕТОДИЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СПРОЩЕНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ В ЗАДАЧАХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА	69
<i>Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К., Будяк Р.В.</i> ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ	72
<i>Рябченко С.В., Сільченко Я.Л., Федоренко В.Т.</i> ШЛІФУВАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ АБРАЗИВНИМИ КРУГАМИ ІЗ ЗОЛЬ-ГЕЛІСВОГО КОРУНДУ	75
<i>Salenko O.F., Kostenko A.O., Orel V.M., Habuzian H.V., Swook Hann</i> POST-TREATMENT AS A MEANS OF ENSURING FUNCTIONAL SURFACE PROPERTIES	77
<i>Сахнюк І.О., Федосеева І.К., Тітова Г.М., Битков М.Х.</i> ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ В ЧАСТИНІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОДУКЦІЇ	82
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В</i> ЕФЕКТИВНИЙ ПРОЦЕС АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ ДІАМЕТРОМ ≤ 12 мм	87

<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возний В.В.</i> ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ДОВЕДЕННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ	92
<i>Тимофеева Л.А., Баглай О.П., Назаренко М.Р.</i> ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	96
<i>Тимофеева Л.А., Гарбуз О.С., Харченко Б.-А.О.</i> ЗАХИСТ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИСКУ У ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	97
<i>Тимофеев С.С., Волошин Д.І., Сергеев О.В.</i> СУБМІКРОННІ МІКРОМЕТРИ У МЕТРОЛОГІЧНИХ ЛАБОРАТОРІЯХ: ВИКЛИКИ, РІШЕННЯ ТА КОНЦЕПЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ	99
<i>Томашевський О.О., Балицька Н.О.</i> СИЛИ І ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ АУСТЕНІТНОГО ТА МАРТЕНСИТНОГО СПЛАВУ NiTi	102
<i>Хворостяний В.В., Долгов М.А., Бодунов В.С., Цисар М.О., Немерцева Н.В.</i> ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ВИПРОБУВАНЬ В УМОВАХ ЗГИНУ З ПОДВІЙНИМ СПІВВІСНИМ КІЛЬЦЕМ ПЛОСКИХ ЗРАЗКІВ ФЛОАТ- СКЛА	104
<i>Цисар М.О., Псярнецька Т.О., Косенчук Т.О., Панасюк Т.С.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ПРУЖНОСТІ АЛМАЗІВ ТИПУ ІЬ ОКТАЕДРИЧНОГО ГАБІТУСУ, ЩО ВИКОРИСТОУВЮТЬСЯ У ЯКОСТІ РІЖУЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ	108

Навчальне видання

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ТА РЕНОВАЦІЯ ВИРОБІВ

Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції,
10–12 червня 2025 р., Київ

Мови конференції: українська, англійська

Комп'ютерна верстка: Копейкіна М.Ю.

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

Підписано до друку 02.06.2025
Формат 60×84×1/16.
Ум. вид. арк. 7,25.



Віддруковано в ПП «Рута»
10014, Україна,
м. Житомир, вул. Мала Бердичівська, 17 а,
тел. 0679621687
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №3671 від 14.01.2010
E-mail: ruta-bond@ukr.net