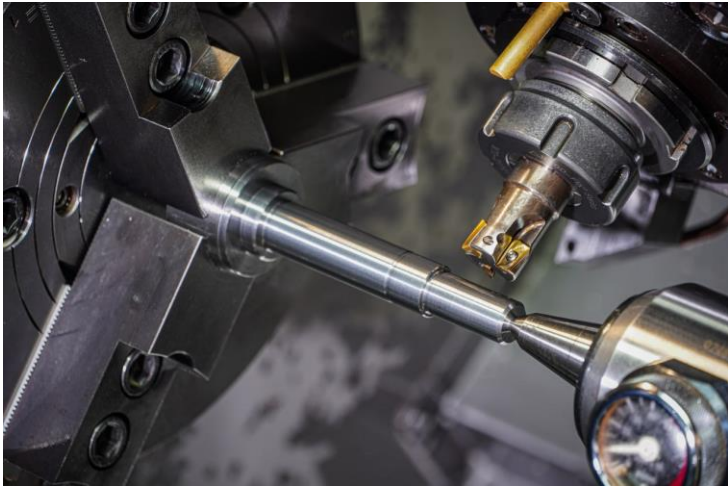


Міністерство освіти і науки України  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»  
Державний університет «Житомирська Політехніка»  
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України  
Механіко-машинобудівний інститут  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
Грузинський технічний університет

## **ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ**



**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
**XII Всеукраїнської науково-технічної конференції**  
**з міжнародною участю**

**м. Житомир, 9–10 листопада 2023 р.**

**УДК 621(082)**

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Державного університету «Житомирська політехніка»  
протокол №6 від 25.10.2023 р.*

Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 9–10 листопада 2023 року. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. – 133 с.

**ISBN 978-966-683-630-7**

Відображено сучасний стан і напрямки розвитку технологій та обладнання процесів механічної обробки матеріалів; виготовлення, зміцнення та відновлення деталей машин; автоматизації виробництва. Наведено результати досліджень, що пов'язані із вирішенням актуальних проблем машинобудування; створення нових конструкцій верстатів та їх елементів, інструментів; підвищення ефективності технологічних процесів.

**В авторській редакції**

**ISBN 978-966-683-630-7**

*Міністерство освіти і науки України  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»  
Державний університет «Житомирська Політехніка»  
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України  
Механіко-машинобудівний інститут  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
Грузинський технічний університет*

## **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ**

### **Голова:**

**ОЛІЙНИК Оксана**, перший проректор Державного університету «Житомирська політехніка», д.е.н., професор

### **Співголови:**

**КЛИМЕНКО Сергій**, Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України (м. Київ), член-кореспондент Національної Академії Наук України, д.т.н., професор

**ПАСІЧНИК Віталій**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор

**МЕЛЬНИЧУК Петро**, Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., професор

### **Відповідальний секретар:**

**ГЛЕМБОЦЬКА Лариса**, Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н.

### **Секретар:**

**ШИШКОВА Оксана**, Державний університет «Житомирська політехніка»

### **Члени організаційного комітету:**

**АНТОНЮК Віктор** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор;

**БОЙКО Ігор** – АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), к.т.н.;

**ВЕРХОВЛЮК Анатолій** – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), д.т.н., професор;

- ВИГОВСЬКИЙ Георгій** – Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент; професор кафебри механічної інженерії
- ГЛАДСЬКИЙ Максим** – ТОВ «Прогрестех-Україна» (м. Київ);
- ГРОМОВИЙ Олексій** – Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент;
- ГУТНІЧЕНКО Олександр** – Лундський університет (м. Лунд – Швеція), к.т.н.;
- ДІМІТРОВ Любомир** – Технічний університет – Софія (м. Софія – Республіка Болгарія), д.т.н., професор;
- ЗАЛОГА Вільям** – Сумський державний університет, д.т.н., професор;
- КИРИЛОВИЧ Валерій** – Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., професор;
- КОВАЛЬОВ Віктор** – Донбаська державна машинобудівна академія, д.т.н., професор;
- КОЗЛОВ Леонід** – Вінницький національний технічний університет, д.т.н., професор;
- МАРЧУК Віктор** – Луцький національний технічний університет, д.т.н., професор;
- МЕЛЬНИК Олександр** – завідувач кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент;
- НЕМИРОВСЬКИЙ Яків** – Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н.;
- ПАНЧУК Віталій** – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, д.т.н., професор;
- ПЕТРАКОВ Юрій** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор;
- ПОЛОНСЬКИЙ Леонід** – Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., професор;
- ТАНОВІЧ Любодраг** – Белградський університет (м. Белград – Сербія), д.т.н., професор;
- ТКАЧУК Андрій** – Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент;
- ТОНКОНОГИЙ Володимир** – Державний університет «Одеська політехніка», д.т.н., професор;
- ТУРМАНІДЗЕ Рауль** – Грузинський технічний університет (м. Тбілісі – Грузія), д.т.н., професор;
- ФЕДОРОВИЧ Володимир** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», д.т.н., професор;
- ШЕВЧЕНКО Олександр** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор.

## ЗМІСТ

1.	<b>Сучасні захисні покриття для інструментів, оснащених надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору</b> Клименко С.А.	8
2.	<b>Поліпшення фізико-механічних властивостей FDM виробів, сформованих поверхневими плівками</b> Саленко О.Ф., Орел В.М., Костенко А.О., Цуркан Д.О., Гаврушкевич А.Ю., Мельничук П.П., Мельник О.Л.	12
3.	<b>Спеціальні властивості ливарних сталей та високоентропійних сплавів</b> Небожак І.А., Сергієнко Р.А., Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Биба Є.Г., Каніболоцький Д.С., Бабюк В.Д., Жидков Є.А.	19
4.	<b>Метод ортогональних векторів як основа вибору роботизованих механоскладальних технологій</b> Кирилович В.А., Дімітров Л., Конопчук О.А., Яновський В.А.	24
5.	<b>Чисельні характеристики рельєфоутворюючих мікроформ для фрактальної параметризації механічно оброблених поверхонь</b> Балицька Н.О., Крижанівський В.Б., Мельничук П.П., Москвін П.П.	26
6.	<b>Від ручного верстату до мобільного інтелектуального верстату - робота</b> Кузнецов Ю.М.	28
7.	<b>Алмазно-абразивна обробка, як важливий фактор розвитку промисловості нескореної України</b> Лаврінєнко В.І.	31
8.	<b>Новітні напрацювання в отриманні за застосуванні шорстких та пористих алмазів (огляд)</b> Лаврінєнко В.І., Смоквина В.В., Солод В.Ю.	33
9.	<b>Виконавчий пристрій мікропереміщень різального інструменту прецизійного верстата</b> Шевченко О.В., Манзюк С.А., Стожаров Є.О.	36
10.	<b>Проблеми із впровадженням освітнього процесу за Болонською моделлю</b> Танович Л.	40
11.	<b>Графи та деякі їх властивості механізмів маніпуляторів</b> Шостачук А.М., Мельничук С.В., Ємець Б.В.	43
12.	<b>Використання методів холодного пластичного деформування для відновлення зношених деталей</b> Немировський Я.Б., Мельник О.Л., Отаманський В.В.	46
13.	<b>Моделювання сили різання при кінцевому фрезеруванні</b> Петраков Ю.В., Охріменко О.А., Сікайло М.О., Мигович А.В.	50
14.	<b>Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь зразків зі сталі 40Х торцевими індукторами на основі постійних магнітів</b> Буріков О.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С.	53

15. **Одержання технологічного мастила для формування внутрішніх пазів в трубчастих виробх деформуючим протягуванням** 56  
Шейкін С.С., Ростоцький І.Ю., Гаврилова В.С., Микищенко О.А.
16. **Особливості використання інструментів із ПКНБ групи VL при обробці загартованих сталей із динамічними навантаженнями** 60  
Клименко С.Ан., Клименко С.А., Манохін А.С.,  
Мельничук Ю.О., Чумак А.О., Копейкіна М.Ю.
17. **Прогнозування витривалості лопаток компресорів ГТД в дослідному виробництві** 63  
Лазарева О.О., Сахнюк Н.В.
18. **Щодо дослідження ефективності процесів відновлення залізничних колісних пар** 66  
Бахман С.О., Мельничук П.П.
19. **Автоматизований контроль процесу свердління деталей із вуглепластику** 68  
Матошин О.В., Вислоух С.П.
20. **Особливості і властивості інструменту для обробки чавунів** 72  
І.А. Коваленко
21. **Характер витіснення магнітно-абразивного порошку з робочої зони при відновленні стрижневим елементом** 75  
Сергієнко І.А., Слободянюк І.В.
22. **Експериментальні дослідження процесу миття металевої стружки** 78  
Чернишов О.В., Чернишов О.О., Чумаченко О.Ю., Яновський В.А.,  
Гайченя А.М.
23. **Умови застосування олівця правлення шліфувального круга** 81  
Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І., Шабля О.І.
24. **Інструментальні матеріали для токарної обробки нікелевого сплаву INCONEL 718** 83  
Євдокимов О.Д., Колесник В.О.
25. **Використання жароміцних матеріалів в виготовленні деталей двигунів літальних апаратів** 85  
Бойко І.А., Коваль Ю.О., Козаченко Н.О.
26. **Аналітичний огляд методів розрахунку і дослідження несучих систем токарних верстатів** 87  
Демчук А.В., Русин П.М., Четвержук Т.І.
27. **Спеціальні наземні роботизовані комплекси для реалізації технології розмінування на основі штучного інтелекту** 90  
Струтинський В.Б., Данильченко Ю.М., Бесарабець Ю.Й.,  
Плівак О.А., Павлун В.С.
28. **Застосування штучного інтелекту для розмінування місцевості спеціальними наземними роботизованими комплексами** 96  
Струтинський В.Б., Данильченко Ю.М., Гуржій А.М.,  
Майданюк С.В., Павлун В.С.

29. **Механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні** 104  
Балицька Н.О., Томашевський О.О.
30. **Розробка конструкції торцевої ступінчастої фрези для  
чистої обробки плоских поверхонь** 106  
Виговський Г.М., Плисак М.М.
31. **Застосування комбінованої схеми різання плоских поверхонь  
загартованих сталей при торцевому фрезеруванні** 109  
Коваленко Я.П., Мазур М.П., Мельничук П.П., Турманідзе Р.С.
32. **Обробка деталей із загартованих сталей інструментом на  
основі кубічного нітриду бору** 111  
Шишкова О.А., Громовий О.А.
33. **Інструментальні матеріали для обробки плоских поверхонь  
деталей з чавунів з вермикулярним графітом багатолезовими  
інструментами** 113  
Радкевич С.І., Обурко Н.В., Глембоцька Л.Є., Мельничук П.П.
34. **Забезпечення технологічних вимог до металорізальних  
верстатів в процесі модернізації** 115  
Бойко І.А., Карнаух В.Л., Юр'єва В.В.
35. **Дослідження впливу технологічних рідин на деформації  
технологічної системи при шліфуванні** 118  
Іванова Л.П., Літовченко П.І., Ночвай В.М., Полонський Л.Г.,  
Степанов М.С.
36. **Підвищення точності фрезерної обробки деталей просторової  
форми низької жорсткості з нержавіючої сталі** 120  
Голубовський А.В., Степчин Я.А.
37. **Характеризація фрезерованих поверхонь ареальним методом** 124  
Бондар Д.С., Балицька Н.О.
38. **Токарна обробка наплавлених сталей мартенситного класу  
інструментом з надтвердих матеріалів** 125  
Храбан Д.В.
39. **Підвищення ефективності фрезерування плоских довгомірних  
деталей шляхом керування динамікою процесу** 127  
Катеринич О.О., Степчин Я.А.
40. **Дослідження процесу алмазного шліфування хромових  
покриттів** 131  
Роп'як Л.Я., Шовкопляс М.В.

УДК 621.9.025.7

**С.А. Клименко**, член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор,  
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

## **СУЧАСНІ ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ОСНАЩЕНИХ НАДТВЕРДИМИ КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ**

З метою вдосконалення різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору (РсВN) створюються покриття, принцип роботи яких ґрунтується на комплексі трибологічних і механо-хімічних ефектів у зоні різання, що обумовлюють здатність покриттів зберігати свою цілісність і властивості під дією високих температур і контактних напружень.

Однією з основних тенденцій у створенні таких покриттів є забезпечення нанорозмірності при формуванні як структурних елементів покриттів, так і окремих шарів у багатошарових композиціях. Перевага наноструктур теоретично обґрунтована фактом істотної зміни фізико-механічних властивостей матеріалу зі зменшенням розміру його структурних складових. Така закономірність описується рівнянням Холла-Петча, що визначає залежність межі плинності (твердості) полікристалічного матеріалу від розміру зерна. При цьому міцність композиту повинна прагнути до теоретичної граничної міцності на зсув. Цей ефект спостерігається, коли середній розмір структурних елементів не перевищує 40 нм.

Формування нанорозмірної структури матеріалу покриття пов'язане з вибором зернистості, оптимальної за критерієм міцності, виходячи з балансу між залежністю за Холлом-Петчем і виразом, що визначає швидкість зерномежової повзучості при зменшенні розміру зерен.

Перспективними, з точки зору застосування на різальних інструментах з РсВN, є нанокompозитні покриття. Це обумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення і дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, внаслідок особливостей структури нанокompозитних плівок.

При створенні багатошарових нанотовщинних покриттів у структурі матеріалу зростає частка міжфазних поверхонь розділу відносно загального обсягу меж розділу. Ці поверхні є перешкодами на шляху поширення тріщин і дислокацій, зумовлюючи підвищення твердості та міцності матеріалу. Ще одним фактором, що сприяє підвищенню твердості, є те, що значення модуля Юнга сусідніх шарів сильно відрізняються. В разі, якщо покриття має нан шарову структуру, то під час зношування має місце пошкодження на глибину в 1–2 шари плівки (6–8 нм). Водночас у монолітному покритті під дією дотичних контактних напружень пластична деформація окремих зерен відбувається в шарах на глибині до 50–75 нм. Як наслідок, швидкість зношування нан шарових покриттів в умовах трибологічного навантаження



значно нижча. Крім того, наночарові плівки, при їх нанесенні вакуум-дуговим методом на пластини з  $\text{PcBN}$ , характеризуються, порівняно з моноблоковими покриттями, меншою схильністю до адгезійного відшарування, що підвищує ефективність різального інструменту з таким типом покриття.

Нанокompatитні структури бувають двох видів: – нітридна нанорозмірна фаза впроваджена в міжкристалітне середовище ( $n\text{-MeN}$ /міжкристалітна фаза); – зерна одного матеріалу утворюють дві фази з різною кристалографічною орієнтацією або суміш нанозерен різних матеріалів.

Набув поширення спосіб створення нанокompatитних покриттів типу  $n\text{MeN}/\alpha$ -фаза – вони формуються з нанозерен твердих нітридів перехідних металів з аморфної міжкристалітної фазою-матрицею з  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{BN}$  та інших сполук неметалів, що утворюють ковалентні зв'язки. Висока твердість таких покриттів обумовлена тим, що через малі розміри нанозерен зародкування і ковзання дислокацій пригнічуються, в той час як висока когезійна міцність тонкої межзереної фази блокує зернограничне ковзання. Аморфна складова при цьому здатна якнайкраще узгоджуватися з поверхнею нанокристалів і забезпечує хороше зчеплення, що призводить до істотного підвищення міцності в системі основа-покриття. Такі покриття мають незвичайну комбінацію механічних властивостей: – висока (40–70 ГПа) твердість; – високе (80–94%) пружне відновлення; – граничні (> 10%) пружні напруження; – висока (від 10 до більш ніж 40 ГПа) міцність на розтягнення, близька до ідеальної міцності для непластичних матеріалів. Наноструктура і відповідний їй надтвердий стан може залишатися стабільним за температур, що перевищують 1100 °С.

Оцінка значень контактних навантажень на різальних інструментах з  $\text{PcBN}$  показує, що середні нормальні та дотичні контактні напруження при обробці сталей високої твердості досягають значень до 2500 і 1100 МПа відповідно. Знизити величину навантажень можна, якщо конструкція покриття буде включати верхній шар, що виконує функції приробки. Основною вимогою до такого прошарку є поєднання пластичності і міцності, при тому що твердість його може бути істотно нижче, ніж твердість основного масиву матеріалу покриття. Матеріал шару приробки повинен мати аморфно-кристалічну низькомодульну структуру ( $\alpha\text{-BN}$ ,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  або  $\alpha\text{-TiB}_2$ ), що дозволить йому виконувати роль твердого змащення.

Термостійкість є важливою вимогою, що пред'являються до покриттів на інструментах з  $\text{PcBN}$ . Подібно механічним властивостям, вона визначається хімічним складом і структурою покриття.

Якщо брати до уваги тільки хімічний склад, то найефективнішими виявляються покриття, що містять  $\text{Cr}$ , у зв'язку з їхньою здатністю чинити опір впливу високих (1000 і 1100 °С для  $\text{CrN}$  і  $\text{AlCrN}$  відповідно) температур, зберігаючи хімічну стабільність, високу гарячу твердість і твердість після відпалу. Це пояснюється інтенсивною дифузією  $\text{Cr}$  до поверхні та формуванням у діапазоні 700–1000 °С щільної структури  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , що запобігає деструкції системи, і тому, наприклад покриття  $\text{AlCrN}$ , є дуже перспективним.

Для підвищення термостійкості покриттів також ефективною є добавка в його матеріал ітрію, що сприяє підвищенню стійкості до окислення внаслідок утворення фази  $Y_2O_3$  на кордонах зерен. Така добавка призводить до дроблення зерен і втрати стовпчастості структури конденсату.

Зокрема, ті ж нанокompозитні системи типу  $nc-MeN/\alpha$ -фаза характеризуються підвищеною термостійкістю. Дрібнозернисті полікристалічні матеріали рекристалізуються під час відпалу за  $T \geq 0,4 T_{пл}$ . При цьому межа термостійкості покриття  $nc-TiN/\alpha-Si_3N_4$ , нанесеного на кремнієву підкладку, досягає  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , що становить 63 % від температури дисоціації  $Si_3N_4$ . Таке підвищення граничної температури зумовлено відсутністю реакції окиснення на межі розділу незмішуваних стехіометричних фаз  $TiN$  і  $Si_3N_4$ , що зумовлено спінодальною природою фазової сегрегації в цій системі.

В якості методу підвищення термостійкості покриття пропонується також використовувати інтергранулярну склоподібну фазу, формування якої можна забезпечити в нанокompозитах, наприклад, шляхом збільшення ( $> 40\%$ ) вмісту кремнію і, відповідно, фази  $\alpha-Si_3N_4$ . При концентрації кремнію більше 50% структура покриття аморфна і аж до температури  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  окислюється виключно тонкий поверхневий шар покриття без будь-яких змін в його об'ємі.

Інший механізм підвищення стійкості інструментів з  $PcBN$  реалізується при використанні «самоадаптивних» покриттів. Основна ідея полягає не в запобіганні окисленню, а в використанні цього явища для управління параметрами контактної взаємодії при різанні та зниження коефіцієнту тертя і, отже, термобаричного навантаження в зоні контакту. Подібні покриття в процесі різання окислюються, утворюючи поліоксидну вторинну структуру (трібоплівку), що грає роль твердого змащення. Наприклад, при точінні інструментом з покриттям  $AlN-Ti(Cr)B_2$  на його поверхні формується поліоксидна трібоплівка, що включає  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  і оксинітрид алюмінію  $Al_xO_yN_z$ . Дані сполуки мають термостабільність до  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , крім того в таких системах утворюються гомогенні ряди твердих розчинів оксидів, що мають гарну змащувальну здатність. Дослідження елементного складу покриття після обробки різанням показали, що на глибині 70 нм має місце різке збільшення кількості кисню і, таким чином, зовнішній нанорозмірний шар інтенсивно окислюється, переходячи в продукти зносу, і знову окислюється. При цьому в шарі, розташованому на глибині 30–70 нм, утворюються обмежені тверді розчини на основі  $Al_2O_3$  (системи  $Al_2O_3-Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3-TiO_2$ ,  $Al_2O_3-AlN$ ).

Подальший розвиток такого підходу може бути пов'язаний зі створенням систем, що містять  $SiC$  і  $AlN$ , які є хімічно стабільними при температурах понад  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ .

Розроблено концепцію підвищення стійкості різальних інструментів з  $PcBN$ , яка базується на зменшенні температури в контактній зоні різання при нанесенні на робочі поверхні інструменту покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Таким покриттям може бути плівка з  $BN$ . Основною відмінністю цього покриття є його аморфно-кристалічний структурний стан і близькість за хімічним складом до матеріалу основи. Ефект досягається за рахунок: –

зниження твердості в порівнянні з інструментальною основою, що зменшує внутрішні залишкові напруження в покритті і знижує крихкість його матеріалу; – зменшення модуля Юнга, що підвищує пружні властивості покриття і стійкість до абразивного стирання; – зниження коефіцієнта тертя, що сприяє зменшенню термобаричного навантаження на робочих ділянках інструменту.

Випробування, проведені на машині тертя, показали зниження коефіцієнта тертя від 0,4 до 0,3 в діапазоні швидкостей відносного переміщення 75–90 м/хв.

Ще одним підходом до підвищення стійкості інструменту, в якому явно проявляється ідея використання покриття як проміжного середовища, що надає прямий вплив на параметри процесу різання, є введення до складу покриття компонентів, які є інгібіторами протікання хімічних реакцій в зоні контактної взаємодії інструментального композиту з оброблюваним матеріалом. Пригнічуючи хімічно обумовлений механізм зношування різальних інструментів з  $\text{PcBN}$ , такі покриття збільшують їх стійкість при високошвидкісному різанні або при обробці конструкційних матеріалів, компоненти яких виявляють високу хімічну активність в парі з нітридом бору.

На основі аналізу результатів значної кількості досліджень механізму впливу покриттів на зношування інструментів з  $\text{PcBN}$  можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів для їх створення: – вибір структурних складових покриття, які в процесі обробки різанням забезпечують формування на робочих поверхнях інструменту високотемпературних поліоксидних трібоплівок, що грають роль твердого змащення і ефективно знижують інтенсивність зношування інструменту; – введення до складу покриття сполук, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії та дозволяють зрушити початок активної хімічної взаємодії в зоні обробки в діапазон більш високих швидкостей різання; – зниження коефіцієнта тертя і контактних навантажень на робочих ділянках інструменту за рахунок твердого змащення і шару покриття з функцією приробки; – забезпечення необхідного структурного стану покриття.

УДК 004.356.2+ 677.017.2/7

**Саленко О.Ф.**, д.т.н, професор,<sup>1</sup>  
**Орел В.М.**, к.т.н., наук. співробітник,<sup>2</sup>  
**Костенко А.О.**, аспірант кафедри конструювання машин,<sup>1</sup>  
**Цуркан Д.О.**, аспірант кафедри конструювання машин,<sup>1</sup>  
**Гаврушкевич А.Ю.**, к.т.н., доцент кафедри конструювання машин,<sup>1</sup>  
**Мельничук П.П.**, д.т.н., професор,<sup>3</sup>  
**Мельник О.Л.**, к.т.н., доцент<sup>3</sup>  
*Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут  
Національного технічного університету України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<sup>1</sup>  
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного  
університету внутрішніх справ<sup>2</sup>  
Державний університет «Житомирська політехніка»<sup>3</sup>*

## **ПОЛІПШЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ FDM ВИРОБІВ, СФОРМОВАНИХ ПОВЕРХНЕВИМИ ПЛІВКАМИ**

FDM-вироби, у першу чергу, інженерного призначення, наразі набувають все більшого поширення. Даний метод створення твердотільних об'єктів передбачає використання як легкоплавких матеріалів (полімерних пластиків, що мають певні реологічні властивості у розплавленому стані та характеризуються потрібними умовами застигання, так і композиційних матеріалів, створюваних власне під час екструзії [1].

Традиційно з цією метою використовують спеціальний армувальний у вигляді дискретних волокон (скляних чи вуглецевих); рідше – у вигляді безперервної нитки, що вводиться в екструдер одночасно із подаванням легкоплавкого філаменту. Зазвичай такі матеріали є більш міцними, виявляють більшу анізотропію, однак можуть підвищити механічні властивості виробу в цілому.

Традиційно руйнування матеріалів, що виявляють квазікрихкі властивості, задовільно описується теорією Гріффітса. З цих позицій для композитів застосовується макромеханічний підхід, коли тіло композита уявляється суцільним гомогенним середовищем, що має ізотропні властивості в умовах певних координатних осей. У цьому випадку напружений стан при вершині тріщини, що утворилась під дією зосередженого навантаження, забезпечує розповсюдження тріщини в напрямку мінімального опору руйнуванню. Припускається, що міцність стабільна за всіма напрямками, що дозволяє очікувати відхилення тріщини від початкового напрямку при  $K_{II} \neq 0$  (зсуву) на певний кут  $\chi = -\chi_c$ , співпадаючий з напрямком максимального значення сили збурення  $P$ , яка обумовлює розвиток тріщини. Прикладання зовнішнього зусилля, при якому буде спостерігатися активне тріщиноутворення, повинно перевищувати опір розтріскуванню.

Внаслідок недосконалості реальних матеріалів, а для композитів внаслідок наявності внутрішніх дефектів та недосконалостей контакту "матриця-армувальник", повний опір розтріскуванню буде залежати від різних типів тріщин (виникнення зсувних тріщин або тріщин відриву). Саме появі та розкриттю початкових тріщин будуть передувати плівки, нанесені на відповідні поверхні оболонки.

Крихіті тріщини у виробках, створених FDM, можуть розвиватися тільки у межах площини викладання філаменту, а критичне напруження, яке викликає появу і розвиток таких тріщин, має бути меншим за межові напруження, що виникають на площинках міжшарової адгезії. Насправді, саме низька адгезійна здатність є причиною появи дефектів і розшарувань у тілі матеріалу; це досить чітко спостерігається на мікрофотографіях зон руйнування.

Особливість процесу FDM полягає у тому, що оболонковий виріб формується пошарово [159]. Оскільки розподіл температур за перерізом сформованого шару має істотні відмінності при зростанні висоти моделі від основи, залишкові напруження, що виникатимуть, будуть відрізнятися.

У випадку нанесення на поверхню зразків додаткових плівок міркування щодо моделей будуть наступними. Вважаємо, що оболонковий виріб постає шаруватою оболонкою із прошарками з дискретних матеріалів. Дана оболонка в процесі деформування описується обмеженою багатозв'язною поверхнею  $S$ , має ізотропні або анізотропні властивості в напрямку осей деформування і описується поверхнею або системою поверхонь (суцільних і дискретних) канонічної форми:  $x_3 = S(x_1, x_2, t)$ , де  $x_1, x_2, x_3$  – координати заготовки в системі відліку  $(x_0, x_1, x_2, x_3)$ ;  $t$  – час.

Вважаємо, що поверхня  $S$  обмежена системою внутрішніх простих контурів  $L_i (i = 1, \dots, n)$  і та контуром  $L_{n+1}$ , який охоплює внутрішні контури  $L_i$ . В оболонці є система  $m$  довільно орієнтованих перетинаючихся підкріплюючих елементів обмежених контурами  $R_i (i = 1, \dots, m)$ . Деформований стан має вигляд:  $\varepsilon_j = \varepsilon_j(x_1, x_2)$

При розв'язанні задачі нелінійного пружного, в'язкопружного або в'язкопластичного (узагальнена модель Максвелла зі змінними коефіцієнтами в'язкості) деформування серединна поверхня оболонки зв'язана з просторовою лагранжевою сіткою  $X^1X^2$ . Тоді при використанні "вузлової схеми", всі шукані величини визначаються в вузлових точках розрахункової сітки.

При моделюванні процесу нелінійного пружного деформування оболонки, що представляє собою в процесі деформування обмежену багатозв'язну поверхню, поверхня розглядається як суцільна полого. В суцільній оболонці, що представляє обмежену однозв'язну область, в якій вздовж контурів, відповідних підкріплюючим елементам (наприклад, стільникам), зосереджені внутрішні джерела або стоки напружень, що зумовлюють стрибки переміщень і кутів повороту. Компоненти деформацій, виникнення яких обумовлено цими джерелами та стоками напружень, виражаються через зосереджені на контурах функціонали, щільності яких є комбінаціями зазначених стрибків переміщень та кутів повороту, і які входять в узагальнені диференціальні рівняння. В

результаті інтегрального представлення розв'язання цих рівнянь при задоволенні граничних умов на берегах контурів підкріплюючої оболонки, задача приводиться до системи сингулярних інтегральних рівнянь для визначення шуканих щільностей. Вирішення інтегральних рівнянь у ряді випадків можна побудувати в аналітичній формі у вигляді рядів за ступенями малого параметра. Таке можливо, коли місцеві підкріплюючі елементи мають простий контур (прямокутник, шестикутник, коло, еліпс тощо).

Для визначення навантажень, що діють на вузли сітки та елементи, запишемо рівняння руху в проєкціях, використовуючи для стислості та зручності тензорну форму запису:

$$\begin{aligned} \nabla_{\beta} H_{mn}^{\beta\alpha} - Q_{mn}^{\beta} B_{\beta mn}^{\beta} + F_{mn}^{\alpha} + Z_{mn}^{\alpha} + I_{mn}^{\alpha} &= 0 \\ H_{mn}^{\beta\alpha} B_{\alpha\beta}^{mn} + \nabla_{\beta} Q_{\beta}^{mn} + F_{mn}^3 + Z_{mn}^3 + I_{mn}^3 &= 0 \end{aligned}$$

де  $H_{mn}^{\beta\alpha}$  – мембранні сили;  $Q_{mn}^{\beta}$  – перерізуючі сили;  $B_{\beta mn}^{\beta}$  – тензор кривизни;  $\nabla_{\beta}$  – знак коваріантного диференціювання;  $F_{mn}^{\alpha}$  – силовий вплив, прикладений до оболонки;  $Z_{mn}^{\alpha}$  – зусилля міжшарового тертя;  $I_{mn}^{\alpha}$  – зусилля, що діє на заготовку зі сторони підкріплюючих елементів, фланців.

Доповнимо останні вирази рівняннями моментів  $\nabla_{\beta} L_{mn}^{\alpha\beta} - Q_{mn}^{\alpha} = 0$  та фізичним законом:

$$\omega(\sigma_{\alpha\beta}^{mn}, \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn}, \dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{mn}) = 0$$

Тиск  $F_{mn}^j$  віднесено до одиниці площі поверхні оболонки та діє у напрямку нормалі  $N_{mn}^j$ . Обмеження випадком крайового навантаження (розрахунковий випадок формування елементів рельєфу, модель жорсткого защемлення) передбачає, що вздовж деякої граничної кривої діє вектор сили, віднесений до одиниці довжини недеформованої серединної поверхні.

Положення кожного вузла серединної поверхні заготовки визначається за діаграмою "зусилля-переміщення". Базисні вектори (коваріантного базису) визначаються в кожному вузлі розрахункової сітки. Компоненти тензора деформації визначаються через прирощення метричного тензора кривизни. При цьому природним для досліджуваного класу деталей є припущення про те, що оболонка є тонкою.

Обчислення деформацій оболонки проводиться з урахуванням багатшарової моделі з підшарами. Як показали дослідження [2,3], найбільш оптимальним є вибір чотирьох шарів за товщиною оболонки. Передбачається, кожен шар оболонки складається з чотирьох підшарів рівної товщини, де сконцентрований матеріал і які працюють в умовах плоского напруженого стану. Ці шари розташовані на рівній відстані один від одного і розділені матеріалом, який не може працювати в умовах плоского напруженого стану в площині, дотичній до оболонки, але який має нескінченно велику жорсткість на зсув у поперечному напрямку.

Напруження та їх прирощення в розглядуваній задачі визначаються за прирощеннями деформацій у кожному вузлі та шарі досліджуваної оболонки.

Розкладемо прирощення тензора деформацій на нелінійно пружну, в'язку та пластичну компоненти:

$$\Delta \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn} = \Delta \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,Y} + \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,\Pi} + \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,Y}$$

Пружні компоненти тензора прирощень деформацій визначаються з механічного рівняння стану, зі змінним модулем зсуву. При цьому залежність між девіаторами напружень та деформацій має нелінійний характер. Механічний процес руйнування композиту розбитий на стадію розсіяних руйнувань (зародження та розвитку системи мікротріщин) та стадію розвитку магістральних тріщин з наступною біфуркацією. Для опису стадії розвитку магістральної тріщини використано спеціальну теорію локальних руйнувань.

За наявності прошарків з дисперсних матеріалів, що відповідає випадку контакту викладеного філаменту в шарі, прирощення деформацій виражаються наступним чином:

$$\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} = \left( \Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^P - \left( \Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^E$$

$$\left( \Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^P = \Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau} \cdot \sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,e,m}$$

де  $\varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$  – компоненти девіатора деформацій;  $\sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$  – компоненти девіатора напружень;  $\Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau}$  – міра пластичної деформації;  $k, l$  – індекси;  $\gamma$  – номер вузла,  $\eta$  – номер шару;  $\tau$  – момент часу процесу деформування.

Рівняння зв'язку між швидкостями деформацій та напруженнями, а також кінематичні співвідношення та рівняння нерозривності мають вигляд:

$$\sigma_{ik} = \frac{\tau_s}{\sqrt{f_1^2 H^2 + f_2^2 \xi_0}} \left[ f_1 \xi_{ik} + \left( f_2 - \frac{1}{3} f_1 \right) \delta_{ik} \xi_0 \right], \quad \xi_{ik} = 0,5 (\dot{\varepsilon}_{i,k} + \dot{\varepsilon}_{k,i}) \quad \partial \rho / \partial t + \rho_{i,i} \dot{\varepsilon}_i / \rho + \xi_0 = 0$$

де  $\sigma_{i,k} \xi_{ik}$  – тензори напружень та швидкостей деформування;  $\dot{\varepsilon}_i$  – вектор швидкості;  $\xi_0 = \xi_{i,i}$  – швидкість об'ємних змін;  $\tau_s$  – опір деформування матеріалу основи;  $H$  – інтенсивність швидкостей деформування;  $\rho$  – відносна густина;  $f_1, f_2$  – функції від  $\rho$ , що входять в умову пластичності еліпсоїдного типу, зв'язані рівнянням:  $T^2 / f_1^2 + \sigma_0^2 / f_2^2 = 1$ , де  $T$  – інтенсивність дотичних напружень;  $\sigma_0$  – середнє напруження.

Фізичний закон (реологічне рівняння) прийнято у вигляді

$$T = T(\rho_0, \Lambda, \varepsilon);$$

$$\sigma = \sigma(\rho_0, \Lambda, \varepsilon)$$

Наявність порожнин та дефектів у друкованому виробі та їх вплив на фізико-механічні властивості враховували на основі визначення коефіцієнту інтенсивності напружень для зароджених і нерозвинених тріщин, щільність яких можна установити на основі механічних випробувань зразків. Методика обчислення КІН отримана із [178], відповідно до якого значення  $K_I$  на основі енергетичних методів визначення  $J$ -інтеграла становлять:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \frac{1+k - (1-k) \cos 2\beta}{2}; \quad K_{II} = \sigma \sqrt{\pi l} \frac{1-k}{2} \sin 2\beta.$$

де  $k = 1$  за умови плоского напруженого стану;  $k = 1 - \nu^2$  за умови плоскої деформації,  $2l$  – ширина тріщини,  $2b$  – ширина зразка, кут  $\beta$  – кут між площиною тріщини та еквівалентним навантаженням.

Оскільки філамент перед формуванням виробу проходив етапи розплавлення, екструзії, викладки та застигання, враховано також і явища, що відбувалися перед охолодженням готового виробу. Для розплаву філаменту (полімерної нитки) дотичні напруження  $\tau$  встановлено за [179] так:

$$\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T - T_1}{T_1 - 273}} \dot{\gamma}^n$$

Тут  $\beta$  – температурний коефіцієнт,  $K$  – коефіцієнт консистенцій (ефективної в'язкості),  $\tau$  – дотичні напруження. Крива плинності для розплаву полімеру  $\tau = K \dot{\gamma}^n$ , де  $n$  – показник степеня, який характеризує ступінь

$$\beta = -\frac{T_1}{(T_2 - T_1)} \ln \left( \frac{K_2}{K_1} \right)$$

неньютонівської поведінки розплаву і є індексом течії. Коефіцієнт  $K$  є функцією температури,  $K \cdot e^{-\beta}$ , тож

Реологічні параметри  $K$  та  $n$  визначають методом найменших квадратів за експериментальними даними.

Теоретичні дослідження виконували на згенерованих твердотільних моделях. Для розрахунків створено 16 моделей, що мають однаковий внутрішній радіус  $R=115$  мм. Товщина стінок оболонок, розмір комірки стільника, висота стільника та товщина стінки стільника залежить від номеру експерименту. Моделі було виконано в CATIA V5, потім імпортовано в Ansys в форматі \*.step.

Моделювання виконували для тестової оболонок у вигляді осесиметричних багат шарових баків (рис. 1). Стінки баку являли собою сполучені шари, викладання яких відбувалося на принтері Creality, а також на циліндричній оправці. Для забезпечення герметичності на внутрішній стінці виконане осадження шару металу, методом гальванопластики, із товщиною шару  $Me$  0,10 мм.

Для експериментальних досліджень використовували виготовлені методами FDM демонстратори. Як зазначалося, герметичність демонстратора забезпечувалася нанесенням на внутрішню поверхню баку плівкового покриття методом гальванопластики. Плівка формувалася з Cu, Zn, що переносився з підкладки на звичайну квадратну пластинку 20x20 мм, надруковану на 3D принтері. Характеристики міцності елементів створюваної системи обирали за результатами досліджень [4].

Нанесення тонкої плівки на внутрішню поверхню підвищує міцність виробу, з незначним зростанням його маси. Проведення серії дослідів дозволило опрацювати отриманий статистичний матеріал та побудувати відповідні діаграми Парето (рис. 2) та впливу прийнятих до уваги факторів,



серед яких один був якісним (марка Me, що осаджувався – параметр  $X_2$ ). Функція відгуку залишена тією ж – еквівалентні напруження  $s_{ei}$ .

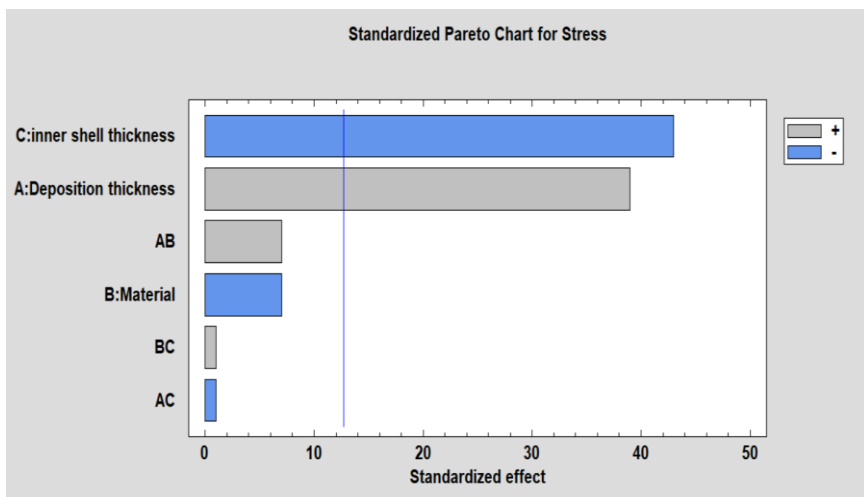


Рис. 1. Друкування зразків для механічних випробувань та тестові зразки

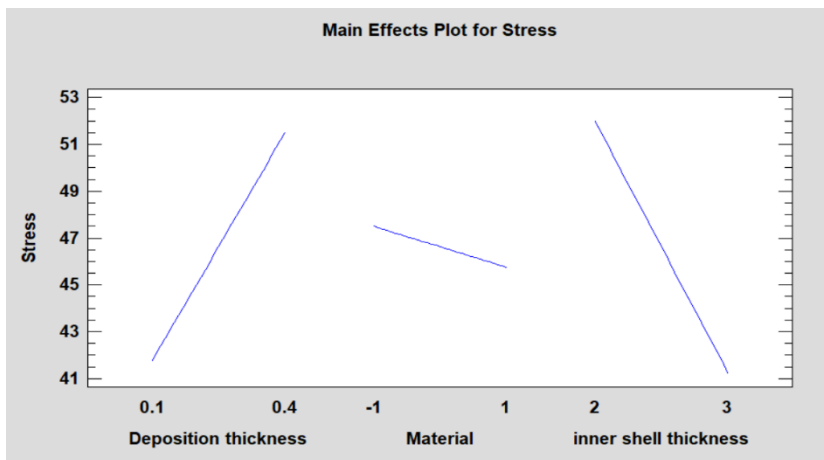
З отриманих діаграм стає очевидним, що товщина стінки стільника та товщина плівки мають практично однаковий по силі вплив, однак різнонаправлену дію. Це відповідає умовам перерозподілу напружень за рахунок формування додаткового шару матеріалу.

Для факторів  $h_1$  та  $t$  отримано регресійні рівняння, що пов'язують ці чинники із міцністю  $s_{ei}$ :

$$s_{ei} = 64,33 + 36,67h_1 - 2,95833Me - 10,34t + 5,82 (Me) h_1 - 1,67h_1t + 0,25(Me)t$$



a)



б)

Рис. 2. Діаграма Парето (а) та головні ефекти впливу (б) для прийнятих до уваги факторів

Незважаючи на обмеженість застосування отриманої залежності, за результатами проведеного повно факторного експерименту із визначенням напружень  $s_{ei}$  з наведених результатів можна зробити висновок, що напруження в досліджуваній моделі без покриття вищі в середньому на 30 % порівняно із тими, що виникають в оболонках із нанесеним покриттям; при навантаженні оболонки тиском  $p_e$  у 5 МПа максимальні напруження становили близько 80 МПа на внутрішній стінці сфери, у той час як плівка товщиною 0,3 мм спроможна знизити ці напруження до рівня 39...40 МПа.

Отже, з точки зору підвищення тріщиностійкості позитивним рішенням є нанесення плівки покриття на внутрішню поверхню баку. У цьому випадку при наявності плівки  $d=0,1$  мм вдається досягти  $K_{Ic}=0,86$  та  $K_{IIc}=0,86$ , що значно перевищує значення оболонок без відповідних покриттів.

Іншим результатом досліджень є висновок щодо важливості наступної фізико-механічної характеристики – тріщиностійкості виробів, яка характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) і відрізняється у початкового філаменту та у готового виробу. Значенні КІН залежить від наявних дефектів, нещільностей сформованого тіла виробу і визначається як використовуваним матеріалом, так і режимами друку.

### Література:

1. Fateri M. Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications / M. Fateri, A. Kaouk, A. Cowley, S. Siarov, M.V. Palou, F.G.

González, R. Marchant, S. Cristoforetti, M. Sperl. // Additive Manufacturing. – 2018, Vol. 24, pp. 400–404. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.020.

2. Ahuja Vineet. Computational analyses of pressurization in cryogenic tanks / Vineet Ahuja, Ashvin Hosangadi, Stephen Mattick, Chun P. Lee, Robert E. Field, and Harry Ryan. // 44 AIAA Joint Propulsion Conference, July 2008.

3. Wink J. Test campaign on a 10kn class sorbitol-based hybrid rocket motor for the stratos ii sounding rocket / J. Wink, A. Cervone, T. Knop, R. Huijsman, S. Powell, K. Samarawickrama, A. Fraters, R. Werner, C. Becker. // AIAA 2014 Space Propulsion Conference and Exhibition – 2014. – p. 1–9.

4. Caulfield B. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process / B. Caulfield, P. E. McHugh, and S. Lohfeld. // Journal of Materials Processing Technology – 2007. – Vol. 182, №. 1–3. – p. 477–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007>.

УДК 669.141.25:669.15-194:669.018.25

**І.А. Небожак<sup>1\*</sup>**, *пров. інж.*,

**Р.А. Сергієнко<sup>1</sup>**, *к.т.н., с.н.с.*,

**А.М. Верховлюк<sup>1</sup>**, *д.т.н., проф.*,

**О.А. Щерцький<sup>1</sup>**, *д.т.н., п.н.с.*,

**Є.Г. Биба<sup>2</sup>**, *к.т.н., доц.*,

**Д.С. Каніболоцький<sup>1</sup>**, *к.х.н., с.н.с.*,

**В.Д. Бабюк<sup>1</sup>**, *н.с.*,

**Є.А. Жидков<sup>1</sup>**, *н.с.*,

<sup>1</sup>*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України*

<sup>2</sup>*Національний технічний університет України*

*«КПІ ім. Ігоря Сікорського»*

## **СПЕЦІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СТАЛЕЙ ТА ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ**

У багатьох галузях народного господарства, зокрема у машинобудуванні, для реалізації сучасних технологічних процесів часто потрібні вироби із металу з високими фізико-механічними та спеціальними властивостями. Це зумовлено, перш за все, умовами експлуатації деталей, її собівартістю та іншими чинниками. Такий комплекс характеристик, на сьогоднішній день, можуть забезпечити лише складнолеговані сталі і сплави, серед яких центральне місце посідають високоентропійні сплави (ВЕС).

Експериментально доведено [1], що ВЕС мають високі твердість і жаростійкість. Таке поєднання є привабливим для застосування ВЕС при виготовленні інструменту для обробки металу різанням спеціальними методами лиття. Найперспективнішим методом ливарного виробництва

металоріжучого інструменту із ВЕС, який поєднав у собі високу розмірну точність з низькою собівартістю придатного литва, є процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Оскільки, інструмент для металообробки працює на зношування, то крім зазначених характеристик необхідно дослідити триботехнічні властивості ВЕС.

Досліджувані виливки отримали за ЛГМ-процесом. Технологічні й металургійні параметри ЛГМ-процесу тезисно описані у науковій праці [2]. Зразки для випробування ливарних сталей та ВЕС на зносостійкість були виготовлені шляхом обробки металу різанням [3] із досліджуваних виливків. Режим термічної обробки зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ було відпрацьовано в умовах центральної заводської лабораторії ПрАТ “МК “Азовсталь” (м. Маріуполь, Україна). Дослідження жаростійкості проводили за методикою, яка була описана в роботах [1, 4]. Для цього використовувався метод синхронного термічного аналізу (СТА) в поєднанні термогравиметрії (ТГ) з диференційною скануючою калориметрією (ДСК).

Дослідження литих зразків на зношування в умовах сухого тертя проводили за оригінальною методикою, запропонованою фахівцями ФТІМС НАН України. Для цього було сконструйовано та виготовлено лабораторну установку (рис. 1) для випробування ливарних сплавів на зносостійкість. Випробування виливків на зношування в умовах сухого тертя проводили за схемою “зразок (вкладиш) – контртіло (вал)”. Зміну маси контртіла й литих зразків контролювали зважуванням на аналітичних терезах моделі “Radwag XAS 100/C”. Математичну обробку результатів проведених досліджень здійснювали за методикою, представленою у роботі [5].



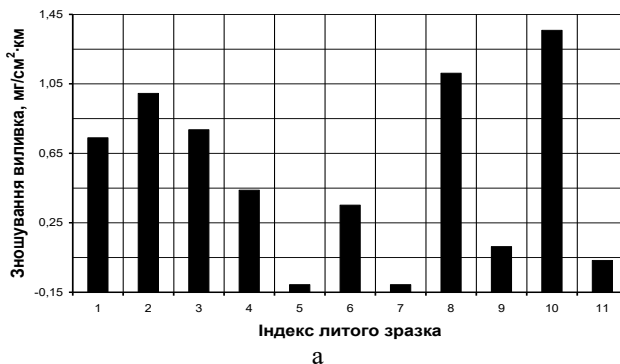
*Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для випробування ливарних сплавів на зношування в умовах сухого тертя*

Як матеріал контртіла у роботі було використано інструментальну леговану сталь марки ХВГ ДСТУ 3953:2000 [6], твердість якої після термічної обробки становила порядку 66 HRC. Габаритні розміри контртіла, мм: діаметр – 40, товщина – 12; габаритні розміри литих зразків, мм: діаметр – 8, висота –  $24 \pm 1$ . Параметри процесу тертя: тривалість випробування – 6000 с; площа контакту

пари “зразок (вкладиш) – контргіло (вал)” –  $5,024 \times 10^{-1} \text{ см}^2$ ; частота обертання контргіла – 1000 об./хв.; лінійна швидкість обертання контргіла – 2,1 м/с; сила нормальної реакції опори (навантаження) – 0,25 кгс (крім легованого зносостійкого чавуну марки ЧХ22Н2, для якого цей показник становить 0,5 кгс); шлях тертя (дистанція) – 10 км.

Експериментально доведено, що триботехнічні характеристики [зношування литого зразка, спрацювання матеріалу контргіла та коефіцієнт тертя ковзання пари “зразок (ВЕС) – контргіло (сталь ХВГ)”] ливарних сталей і сплавів залежать від їх хімічного складу та макро-, мікроструктури. Результати поставленого експерименту у вигляді стовпчастих гістограм (рис 2) наведені далі за текстом.

Таким чином, результати проведених досліджень дозволили дійти висновку, що найвищу зносостійкість серед перших 4-х сплавів, які є стандартними, має зносостійка складнолегована сталь марки 75ХФТЛ ТУ 4112-78269737-001-2005 [див. рис. 2 (а)]. Це дає підставу стверджувати, що усі ВЕС, зношування яких нижче  $0,438 \text{ мг/см}^2\cdot\text{км}$ , тобто зношування зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ, можна рекомендувати для використання при виготовленні інструменту для обробки металу різанням спеціальними методами лиття. Інструментальними матеріалами, які варто було б експлуатувати в умовах сухого тертя на зношування, слід вважати ВЕС наступного хімічного складу: 5 –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{18}\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15,5}\text{Cu}_{17}\text{C}_{3,7}\text{Si}_{1,8}$ , 6 –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{19,5}\text{Cr}_{18}\text{Al}_{12} \text{Cu}_{21}\text{Mn}_{0,3}\text{C}_{3,2}\text{Si}_2$ , 7 –  $\text{Fe}_{20,5}\text{Ni}_{19,4}\text{Cr}_{16,5}\text{Cu}_{20}\text{Mn}_{19}\text{C}_{2,3}\text{Si}_{2,3}$ , 9 –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{19}\text{Cr}_{15,5}\text{Cu}_{20,5}\text{Al}_{15}\text{Mn}_{0,5} \text{C}_{3,5}\text{Si}_2$ , 11 –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Mn}_{18}\text{Cu}_{22}\text{Si}$ . Особливої уваги, серед цих матеріалів, заслуговує ВЕС з індексом 11 –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Mn}_{18}\text{Cu}_{22}\text{Si}$ , оскільки, крім зносу, еквівалентного  $0,033 \text{ мг/см}^2\cdot\text{км}$ , цей сплав, що утворює з інструментальною сталлю марки ХВГ пару тертя, має найнижчий коефіцієнт тертя ковзання [див. рис. 2 (б)] – 0,243. Більше того, спрацювання матеріалу контргіла, яке працює у парі з ВЕС № 11 (раціональна формула –  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Mn}_{18}\text{Cu}_{22}\text{Si}$ ) [рис 2 (б)], у даному випадку, набуває мінімального значення, тобто  $0,060 \text{ мг/см}^2$ . Отже, досліджуваний ВЕС можна рекомендувати для застосовування у машинобудуванні як зносостійкий антифрикційний матеріал.



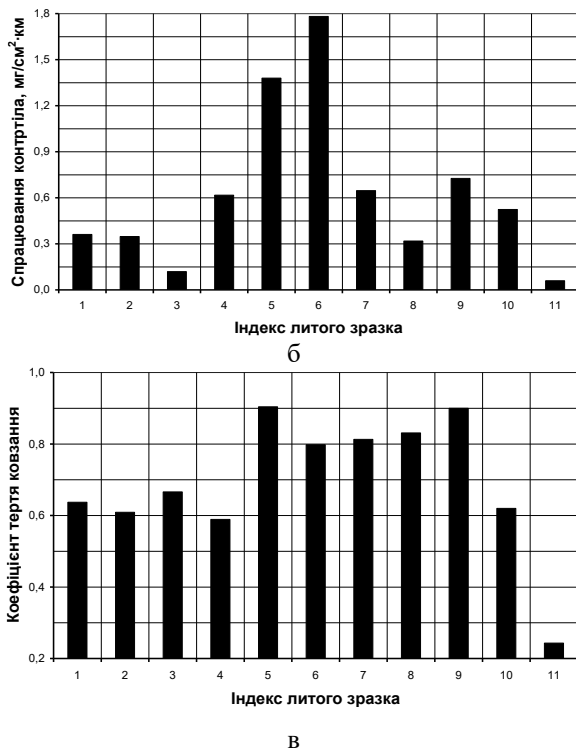


Рис. 2. Триботехнічні властивості виливків:

1 – чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 70ХЛ (БТО);

3 – сталь 75ХФТЛ (БТО); 4 – сталь 75ХФТЛ (ГМНВ);

5 –  $Fe_{24}Ni_{18}Cr_{20}Mn_{15,5}Cu_{17}C_{3,7}Si_{1,8}$  (BEC);

6 –  $Fe_{24}Ni_{19,5}Cr_{18}Al_{12}Cu_{21}Mn_{0,3}C_{3,2}Si_2$  (BEC);

7 –  $Fe_{20,5}Ni_{19,4}Cr_{16,5}Cu_{20}Mn_{19}C_{2,3}Si_{2,3}$  (BEC);

8 – чавун [Fe – 73 %, Ni – 16 %, Cr – 2 %, Mn – 1 %, Cu – 3 %, C – 3 %, Si – 2 %, S – 0,025 %, P – 0,035 %];

9 –  $Fe_{24}Ni_{19}Cr_{15,5}Cu_{20,5}Al_{15}Mn_{0,5}C_{3,5}Si_2$  (BEC);

10 –  $Fe_{22}Ni_{21}Cr_{14}Cu_{23}Al_{19,5}Mn_{0,5}$  (BEC);

11 –  $Fe_{24}Ni_{20}Cr_{15}Mn_{18}Cu_{22}Si_1$  (BEC); БТО – без термічної обробки;

ГМНВ – гартування з охолодженням на масло та низьким відпуском

Також було встановлено, що максимальну стійкість до окислення мають ВЕС до складу яких входить Al. Це пояснюється тим, що за рахунок утворення щільної оксидної плівки  $Al_2O_3$  на поверхні литих зразків вони (ВЕС) не окислюються в ін-тервалі температур від 25 °С до 1450 °С, що досліджується. Експериментально доведено, що жаростійкість ВЕС перевищує жаростійкість

стандартних сталей таких як 45Л та 12Х18Н9ТЛ, а також жароміцного сплаву марки СМ96. Таким чином, ВЕС проявляють надзвичайну стійкість до атмосферного окислення при високотемпературному нагріванні, що робить їх придатними для застосування при виробництві інструменту для металообробки, який працює на зношування в умовах сухого тертя.

### Література:

1. Сергієнко Р.А., Щерецький О.А., Верховлюк А.М., Матковський Д.Ю. Дослідження високотемпературного окислення високоентропійних сплавів системи FeCoNiCrMnAl. *Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві*: мат. ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., 25–27 верес. 2023 р., м. Краматорськ. Краматорськ : ДДМА, 2023. С. 105–106.

2. Небожак І.А., Небожак Я.І., Пересенчук В.В., Шинський О.Й. Дослідно-експериментальна партія виливків, отриманих за допомогою дисперсно-наповнених моделей, що газифікуються. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29, № 4 (327). С. 78–84.

3. Обробка металів різанням: Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Обробка\\_матеріалів\\_різанням](https://uk.wikipedia.org/wiki/Обробка_матеріалів_різанням) (дата звернення: 24.10.2023).

4. Бабчук Р.В. Технологічні рекомендації для підвищення жаростійкості сталі 45 за допомогою дифузійних покриттів: магістерська дисертація: 161 / МОН України. НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”. Київ, 2022. 97 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56530/1/Babchuk\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56530/1/Babchuk_magistr.pdf) (дата звернення: 04.12.2023).

5. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. / МОН України. ТНТУ ім. Івана Пулюя. Тернопіль, 2011. 322 с. URL: [http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1076/1/TextBook\\_Zakalov\\_Basic.pdf](http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1076/1/TextBook_Zakalov_Basic.pdf) (дата звернення: 30.10.2020).

6. Сталь ХВГ: склад, застосування та характеристики <https://what.com.ua/stal-hvg-sklad-zastosyvannia/>.

УДК 621.865.8

**В.А. Кирилович**, д.т.н., проф.<sup>1</sup>,  
**Дімітров Любомир**, д.т.н., професор,<sup>2</sup>

**О.А. Конопчук**, маг.<sup>1</sup>,

**В.А. Яновський**, доц.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Державний університет “Житомирська політехніка”

<sup>2</sup>Технічний університет-Софія, м. Софія, Болгарія.

## МЕТОД ОРТОГОНАЛЬНИХ ВЕКТОРІВ ЯК ОСНОВА ВИБОРУ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Задача вибору роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ) є новою як в своїй первинній постановці, так і щодо використання різних методів та методик її розв’язування. Так, наприклад, в Державному університеті “Житомирська політехніка” задача вибору РМСТ розв’язана з використанням методик квазі-кращого випадку, найгіршого випадку, серединними випадками на основі таких серединних параметрів як середньоарифметичний, медіанний, середньоквадратичний та середньгеометричний. В дещо іншій постановці розв’язана задача вибору Парето-оптимальних РМСТ. Всі постановки вищевказаних задач базувались на попередньо проведеному строгому експертному опитуванні. Його результати стали загальними для розв’язування усіх задач та зберегли загальну розмірність  $n=10$  (кількість експертів)  $\times$   $m=12$  (кількість локальних критеріїв вибору). Вказане витримано раніше та витримуватиметься в подальшому для коректності порівнянь та аналізу отримуваних результатів.

Загалом згадані вище задачі вибору РМСТ як задачі векторної (багатокритеріальної) оптимізації розв’язані як нечіткий багатокритеріальний вибір альтернатив (НБВА). Альтернативами виступають судження експертів і змістовно проявляються як упорядкована для кожної альтернативи (кожного експерта) множина локальних критеріїв із їх дискретної множини (ДМЛК), що в свою чергу є власне проявами РМСТ.

Нижче стисло наведено зміст методично обумовленого багатоетапного (Е) та багатокрокового (К) процесу та результат вибору РМСТ на основі методу ортогональних векторів **ТАОВ** (Total Area based on Orthogonal Vectors), який базується на ортогональності критеріїв рішення та використанні головних компонентів для усунення кореляції між локальними критеріями вибору, що реалізовано для вище зазначених початкових даних та умов.

Загалом використання методу **ТАОВ** передбачає виконання трьох його етапів: **Е1** – ініціалізація (initialization), який реалізується кроками **К1**, ..., **К6**; **Е2** – ортогоналізація (ortogonalization), де виконуються кроки **К7.1** та **К7.2**, та **Е3** – порівняння (comparision) з виконанням кроків **К8.1** та **К8.2**. Саме в такій



послідовності нижче проілюстровано метод **ТАОВ**. Фактично його відмітними від вищеназаних методів та змістовними кроками є кроки **К.5 ... К.8.2**.

Кроки **К.1, ..., К.4** є загальними для цієї та вищеназаних методів НБВА і змістовно означають відповідно формування множини експертів  $E=(E_i | i = \overline{1, n})$  (**К.1**); множини локальних критеріїв  $S=(S_{ij} | j = \overline{1, m})$  (**К.2**); формування матриці строгого експертного опитування  $(E \times S) \rightarrow M_c[n \times m]$  ( $\times$  - декартовий добуток) (**К.3**) та розрахунок елементів матриці ваг альтернатив  $M_w[n \times m]$  (**К.4**).

Кроком **К.5**, що є, власне, першим відмітним кроком для **ТАОВ**, виконується розрахунок елементів нормованої матриці рішень  $M_{r_{ij}}[n \times m]$ . Її елементи  $r_{ij}$  розраховуються за відомою аналітикою з врахуванням критеріїв переваг за принципами (правилами) або “чим більше, тим краще”, або “чим менше, тим краще”.

Реалізація кроку **К.6** спрямована на формування зваженої нормованої матриці  $M_{-r_{ij}}[n \times m]$ , елементи якої  $-r_{ij}$  отримані множенням кожного нормованого елемента  $r_{ij} \in M_{r_{ij}}[n \times m]$  (див. **К.5**) на відповідні ваги критеріїв  $w_{ij}$  матриці ваг  $M_w[n \times m]$  (див. **К.4**).

На кроці **К.7** для забезпечення незалежності любых двох стовпців нормованої матриці  $M_{-r_{ij}}[n \times m]$  виконується перетворення векторів поточних критеріїв із ДМЛК до ортогональних векторів. Для цього на кроці **К.7.1** до матриці  $M_{-r_{ij}}[n \times m]$  застосовується аналіз головних компонентів (**PCA** - Principle Component Analysis). Саме **PCA** знаходить незалежну лінійну комбінацію векторів, які називаються головними компонентами. Кожен основний компонент є лінійною комбінацією векторів  $(r_1, r_2, \dots, r_m)$ . Для перетворення корельованих критеріїв у незалежні розраховуються коефіцієнти головних компонентів з використанням загальнодоступного програмного пакету **SPSS** (Statistical Package for the Social Sciences). Останній являє собою комп'ютерну програму для статистичної обробки даних, яка призначена для проведення прикладних досліджень у різних сферах. Результатом цього є ортогональна матриця  $M_{PCA}[n \times n]$ .

Кроком **К.7.2** шукається ортогональна матриця рішень  $M_{or}[n \times m]$  із врахуванням того, що в ортогональній матриці  $M_{PCA}[n \times n]$  стовпці ортогональні, що дає можливість визначати відстань між різними критеріями за евклідовою відстанню (теорема Піфагора).

Множина кінцевих рішень виконується кроком **К.8.1**, елементи якої проіндексовані початковими індексами кожного із елементів ДМЛК. Змістом кроку **К.8.2** є упорядкування попередньо отриманих рішень за кроком **К.8.1**.

На основі методу ортогональних векторів (**ТАОВ**) отримано наступний результат НБВ РМСТ:

$$\begin{array}{l}
 \text{ТАОВ } S_{\langle j \rangle} = \langle \\
 \frac{Fopt=S12}{1.0762} \quad \frac{Rl=S8}{1.0202} \quad \frac{Ac=S10}{0.8277} \quad \frac{Fc=S11}{0.2004} \quad \frac{Ec=S9}{0.1617} \quad \frac{Dn=S3}{0.1519} \quad \frac{Ct=S4}{0.1375} \quad \frac{Tr=S6}{0.1317} \quad \frac{\tau(Q)=S7}{0.1299} \quad \frac{En=S5}{0.1263} \quad \rangle
 \end{array}$$

$$\frac{Gm = S1}{0.1246}, \frac{Rn = S2}{0.1036} >$$

Тут в чисельнику вказані локальні критерії вибору, а в знаменнику нечіткі оцінки, за якими і виконувалось їх ранжування від найбільшої оцінки до найменшої за результатами використання методу **ТАОУ**.

Необхідно зауважити, що із збереженням описаного вище така постановка даної задачі є новою і таким чином дана задача ніколи і ніким не розв'язувалась, що і визначає новизну даної роботи в певних її проявах.

УДК 621.914.1

**Н.О. Балицька**, *к.т.н., доцент,*  
**В.Б. Крижанівський**, *к.фіз.-мат.н., доцент,*  
**П.П. Мельничук**, *д.т.н., професор,*  
**П.П. Москвін**, *д.фіз.-мат.н., професор,*  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ЧИСЕЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬЄФОУТВОРЮЮЧИХ МІКРОФОРМ ДЛЯ ФРАКТАЛЬНОЇ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ МЕХАНІЧНО ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Формування і контроль поверхневого мікрорельєфу виробів, який визначає їх основні функціональні властивості, є важливим науково-технічним завданням. Тому розробка й подальше удосконалення методів експериментального дослідження та математичного опису рельєфу поверхонь у рамках малих просторових масштабів є актуальною задачею для сучасної промисловості.

Один із методів математичного опису мікрорельєфу поверхні виробів пов'язаний із застосуванням фрактального аналізу. Основною перевагою такого нетривіального підходу є його чітке фізичне обґрунтування, що базується на принципах самоподібності та фрактальних видах симетрії.

Авторами цієї роботи накопичено певний досвід експериментальних і теоретичних досліджень в області фрактального аналізу фрезерованих поверхонь матеріалів [1–3]. У цих роботах на основі аналізу фрактальних спектрів була доведена можливість кількісного опису поверхневого мікрорельєфу виробів, а також показана можливість коригування параметрів рельєфу завдяки зміні режимів обробки.

Принциповим моментом у застосуванні мультифрактального аналізу до опису мікрорельєфу поверхні зразків є конкретний вибір того фізичного параметра, який найбільш повно її характеризує і підлягає фрактальній параметризації. Серед можливих чисельних характеристик просторових форм, що утворюються на фрезерованій поверхні, знаходження яких призведе до можливості розрахунків фізичних характеристик системи у фрактальному

наближенні, було обрано площу та об'єми рельєфоутворювальних мікроформ. Відомо, що між вказаними параметрами відсутня пряма кореляція.

Однією з передумов для виконання даного дослідження є той факт, що стандартні методи оцінки параметрів мікрогеометрії поверхонь часто не дозволяють прогнозувати їх функціональні властивості. Прикладом цього твердження може стати порівняння характеристик двох профілів поверхонь (рис. 1).



Рис. 1. Схема профілів мікрорельєфу поверхонь

Наведені на рис. 1 поверхні характеризуються однаковим значенням шорсткості  $Ra$ , але при цьому їхні експлуатаційні властивості є зовсім різними. Очевидно, що в розглянутому випадку для обох профілів площа поверхневих мікроструктур буде однаковою, а об'єм поверхневих мікроформ – різним. Це доводить, що площі та об'єми елементів, які формують поверхневий мікрорельєф, утворюють незалежні математичні множини на поверхні зразка.

Отже площа та об'єм рельєфоутворюючих елементів поверхні можуть використовуватися як незалежні вхідні характеристики для фрактального аналізу мікрорельєфу механічно оброблених поверхонь, що, в свою чергу, дає можливість застосовувати результати розрахунків для визначення функціональних властивостей цих поверхонь.

### Література:

1. Balytska N, Kryzhanivskyy V, Melnychuk P, Vyhovskiy H, Moskvina P (2024) The multifractal analysis of periodic surface relief of parts after face milling. *Advanced Manufacturing Processes V*. InterPartner 2023. Lecture notes in mechanical engineering. Springer, Cham. 117–126.
2. Balytska N., Penter L., Ihlenfeldt, S., Kryzhanivskyy V., Melnychuk P., Moskvina P. (2023) Multifractal parameterization of a periodic surface microrelief formed at the face milling. 1. The distribution of elements area of surface relief. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. V.6, 561–572.
3. Moskvina P, Balytska N, Melnychuk P, Rudnitskiy V, Kyrylovych V (2017) Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling. *EEJET*. V.2 (1–85), 9–15.

УДК 621.9.06:658.52.011.56

**Ю.М. Кузнєцов**, д.т.н., професор,  
*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*

## **ВІД РУЧНОГО ВЕРСТАТУ ДО МОБІЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ – РОБОТА**

Вся людська діяльність спрямована на задоволення суспільних та особистих потреб, що змушує людей взаємодіяти з навколишньою природою і вступати у певні відносини один з одним. У процесі такої діяльності Людиною створюються і безперервно ускладнюються діючі антропогенні системи, які створені в результаті свідомо спрямованої людської діяльності. Інколи науково-технічний прогрес завдає шкоду людству, у новітній історії земної цивілізації прикладів більш ніж достатньо. Якщо звернутися до витоків створення Людиною механічних систем, то знаряддя кам'яної доби представляли прості форми тіл, на основі яких з'явилися всі наступні винаходи в механіці [1]. Саме з таких позицій можна простежити розвиток техніки від минулого через сучасне в майбутнє на прикладі еволюції розвитку та синтезу верстатів, як машин, що створюють інші машини, використовуючи для цього геометричні побудови. В історії розвитку техніки з появою машин почали вести розмову про промислові революції. Кілька років тому людство стикнулося перед викликами четвертої промислової революції «Індустрія 4.0» із широким проникненням автоматизації, роботизації, інформатизації, комунікації та всього, що стосується суспільства, бізнесу, виробництва та освіти. А сьогодні ми наблизилися до «Індустрія 5.0» і «Суспільство 5.0».

Засновник Всесвітнього економічного форуму Клаус Шваб зазначив, що настав час масового впровадження кіберфізичних систем у виробництві, що стирає межі між фізичними, цифровими та біологічними сферами. З'явилися інтелектуальні роботи, дрони, розумні будинки та міста, дослідження головного мозку, а товар у процесі випуску може сам визначити обладнання, здатне виробити його. Пояснити все, що відбувається в 21-му столітті, можливо тільки з використанням законів еволюції систем різного походження [2]. Наш співвітчизник акад. Вернадський В.І. і кібернетики, говорячи про біосферу і антропогенні системи, вказували, що вони утворені кістковою речовиною і є місцем існування живої речовини. Подібно до біологічних об'єктів вони знаходяться в еволюційному розвитку. Доведено, що мозок Людини має таку ж організацію, як і промислове підприємство. У загальній картині еволюції еволюцій за Завадським К.М. штучний інтелект підпорядковується тим самим законам розвитку, що біологічні та антропогенні системи. Вдалося встановити, що еволюція обчислювальної техніки проходить під дією природного закону гомологічних рядів за Вавиловим М.І., який є загальним для еволюції клітини, Людини та промислового обладнання.

Електромеханіка стала однією з перших технічних дисциплін, де розроблені основи теорії генетичної еволюції структур електромеханічних систем [2], в яких запропоновано генетичну класифікацію первинних джерел електромагнітного поля, а геном прийнятий електричний заряд. З використанням міждисциплінарного підходу електромеханіки і механіки створили перші в світі самодіючі (гібридні) мотор-шпинделі і запропонували єдину інформаційну мову для опису електромеханічних і механічних систем однаковим генетичним кодом.

Запропоновано концепцію створення технологічного обладнання нових поколінь [1]. Реалізація запропонованої концепції потребує використання як основних законів Природи, так і знання у різних галузях науки. Прикладом реалізації концепції стали створені верстати із штангами постійної довжини, як альтернатива верстатам-подам із штангами керовано-змінної довжини.

Другим прикладом є створення високопродуктивних верстатів-автоматів для шліфування бурштинових кульок після автоматичного сортування при мінімальних витратах на виготовлення верстата і його експлуатацію і забезпеченні високої якості за рахунок паралельної багатопозиційної обробки, модульного принципу, активного контролю і комп'ютерного керування [3].

Відкриття парадоксальних нових ефектів і явищ, що здаються на перший погляд, об'єктивно існуючих у Природі, дозволяє на багато років вперед прогнозувати і передбачати розвиток науки і техніки, вирішувати найскладніші проблеми, що стоять перед людством, серед яких енергетичні, екологічні, сировинні, інформаційні та ін. Для розв'язання різних проблем і створення нової техніки Людина звертається до Природи, самої себе і прагне створити нове за своєю подобою.

У статті [4] вчені з Інституту робототехніки та інтелектуальних систем швейцарської вищої технічної школи (м. Цюрих) навчили «маму-робота» автоматично збирати «дітей-роботів» із заданих компонентів, щоб простежити, як вони рухаються, моделюючи складний процес еволюції роботів без будь-яких компромісів. Запропонована система використовує основні закони генетики, такі як кросинговер, мутація та схрещування елітних особин для створення десяти наступних поколінь із п'яти експериментів. 10 поколінь роботів були сконструйовані, еволюціонували та вдосконалилися.

Аналогічні підходи використані при створенні мобільних роботів довільної орієнтації [5] для умов, де є небезпечною присутність людини (наприклад, патент на винахід №121132). Сфера застосування таких роботів розширюються.

Актуальними стають питання філософії і конструювання майбутнього, що пов'язано з генетичним передбаченням. Прикладом наукового генетичного передбачення є багатоцільовий верстат-робот майбутнього. Довгостроковий прогноз з ймовірністю вчинення 100% на основі генетичного передбачення можна подати у вигляді піраміди передбачення на 5-ти рівнях: Для верстатів майбутнього при наближенні форми заготовки до форми готової деталі докорінно зменшується вага верстата по відношенню до ваги деталі, відпадає необхідність у фундаментах, починаючи від міні-верстатів і аж до унікальних.

Попереду на машинобудівників чекають нові відкриття на стику різних наук, що вкотре підтверджує актуальність міждисциплінарного підходу, реалізованого в КПІ ім. Ігоря Сікорського. Жодне явище Природи, як основного творця, не може бути до кінця зрозуміле без застосування законів механіки, усвідомлення їхньої механічної суті та жодну нову техніку не можна створити, не використовуючи при аналізі та синтезі ті чи інші об'єктивні закономірності. Тому механіка одна із основ прогресу природознавства і техніки вчора, сьогодні, завтра. Людина навчилася виливати металеві вироби, несучі системи і інші деталі, почала виготовляти композиційні матеріали, що не поступають металевим, а з появою електродвигунів, систем програмного управління, 3D-принтерів та агрегатно-модульного підходу, суттєво збільшилася кількість варіантів компоновок, наприклад, свердильно-фрезерних верстатів, при цьому поки збережена успадкована генетична інформація про присутності Людини біля верстата та розташування пультів керування з одного боку робочої зони, що не змінило принципу компонування, залишаючи її несиметричною. Повернення в компонуванні верстатів до симетрії, що генетично було закладено в кам'яному віці та використання досягнень в ЕМ-системах, електроніці та інформатиці дозволяє створити верстати нового покоління відкритого доступу з різних сторін з несучою системою у вигляді різного каркасу симетричної форми.

**Висновок.** Науково обґрунтовані прогнози на 21-е століття здивують мешканців Землі всепереможною урочистістю генетики, кібернетики, хімії, біоніки, космонавтики, нано-робототехніки, а також створенням: першої електронної копії людської особистості з надвисокими здібностями мозку; комп'ютерів із надвисокими потужностями; людиноподібних роботів, оснащених емоціями; умов значного продовження довголіття людини; нових матеріалів із заданими властивостями. Аналіз етапів еволюції творчого мислення з переходом до машинного, запропоновані ідеї і підходи дозволяють стверджувати про реальність використання спрощених систем штучного інтелекту з високим рівнем креативності і подальшим їх удосконаленням. Тому роботи в цьому напрямку необхідно продовжити, взявши на озброєння гасло: **«Основним творцем є Природа, а Людина-одне з неперевершених її творінь та творець за своєю подобою».**

### Література:

1. Кузнецов Ю.М. Еволюційний та генетичний синтез технологічного обладнання нового покоління /Ю.М. Кузнецов //Міжн. наук.-техн. збірник «Різання та інструмент в технологічних системах». Вип. №85.-Харків: НТУ «ХП», 2015. – С. 149-162.
2. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем: монографія.-К.: Наукова думка, 2002.-288 с.
3. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури -Херсон: ПП Вишемирський, 2009. – 258 с.

4. Vido.com.ua/article/12779/mama-robot-sozdaiet-robotov-dietei-dlia-izuchenia-iskusstyienonoi-evol

5. Кузнецов Ю.М., Поліщук М.М. Генетичний і системно-морфологічний підходи при створенні нової робототехніки /Кол. монографія //”Modern scientific strategies of development”, Publishing house “GS Publishing Services” Sherman oaks, California (USA), 2022.-pp. 253-262. DOI: 10.51587/9781-7364-13395-2022-008-253-262.

УДК 621.923

**В. І. Лавріненко**, д.т.н., професор, завідувач відділу  
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

## **АЛМАЗНО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА – ВАЖЛИВИЙ ФАКТОР РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ**

Технічний алмаз є важливим стратегічним матеріалом для промисловості будь-якої розвиненої країни світу. Нині Китай є найбільшим в світі виробником (56 % світового виробництва). Частка Індії складає 15 %. США займають третє місце з 13 %. За споживанням найбільший ринок є у США (80 % від загального споживання).

Чому ці країни приділяють таку увагу алмазам? Зараз вік – штучних матеріалів. Нові матеріали створюються, але виникає протиріччя, яке потребує вирішення. Нові матеріали переважно є важкооброблюваними, а відтак затребуваними є інструментальні матеріали, які будуть здатними їх «угризти», тобто необхідні дуже тверді, навіть супертверді інструментальні матеріали. Так склалося, що в природі єдиним таким матеріалом є – алмаз. В ХХ сторіччі вченим вдалося отримати алмаз в лабораторних умовах та освоїти їх промисловий випуск. Також вченим вдалося отримати один надтвердий матеріал, аналогів якого нема в природі – кубічний нітрид бору (КНБ). Ці два матеріали є сучасним наукоємним високотехнологічним продуктом, що є важливою ланкою у вирішенні питань ефективної механообробки важкооброблюваних матеріалів ХХІ сторіччя. Вони мають низку унікальних властивостей – високі твердість, міцність під час стиску, тріщиностійкість, теплопровідність, хімічну стійкість і т.п., завдяки чому вони і широко застосовуються у сучасному машинобудуванні, як ефективний інструментальний матеріал. Нагадаємо, що навіть у випадках техногенних катастроф фахівці зверталися за допомогою до алмазу. Так, коли в Україні сталася аварія на Чорнобильській АЕС, були використані алмазні свердла для свердління отворів у стінці барботеру 4 блоку. Коли сталася аварія із підводним човном «Курськ», знадобилися алмазні канатні пили для відділення і підняття атомного реактору, щоби уникнути забруднення моря. Для марсіанського позашляховика Lander, який став першим буровим агрегатом в

історії, що пробив шурф на іншій планеті, застосована титанова коронка з алмазним композитом. Тобто, подальшим напрямком підвищення ефективності застосування таких матеріалів є новітні розробки в створенні сучасних інструментів, що містять алмази. Як наслідок, нині в багатьох галузях машинобудування, таких як, підшипникове, інструментальне та оптико-механічне виробництво обсяг використання алмазно-абразивної обробки в об'ємі випуску продукції досягає 50 %.

В складі НАН України функціонує Інститут надтвердих матеріалів, одним з основних напрямків роботи якого є саме розробка ефективних алмазно-абразивних процесів обробки та розробка спеціального алмазно-абразивного інструменту, в т.ч. прецизійного правлячого. Інститут є розробником також другого надтвердого матеріалу – КНБ. Цей матеріал є незамінним для шліфування загартованих сталей, де алмаз не застосовується внаслідок його взаємодії із сталлю. Інститут активно працює з машинобудівними підприємствами України, займається буровим і каменеобробним інструментом. На жаль, нині багато підприємств, які знаходяться на сході України (міста Харків, Дніпро, Миколаїв, Запоріжжя) потрапляють під обстріли, але і нині співробітництво продовжується. До речі і ІНМ також піддався обстрілу, що безумовно не сприяло активній роботі, але зараз колектив науковців намагається це подолати. Вкажемо, що навіть за умов військових дій важливими є розробки для підприємств Укроборонпрому: прецизійні керамічні кульки для підшипників гелікоптерів (їх отримання без алмазного інструменту не обійдеться), прецизійний алмазний правлячий інструмент для виготовлення деталей БПЛА, алмазний інструмент для обробки наплавлень при поновленні військової техніки, тощо.

Інститут має унікальну можливість застосовувати алмази широкого діапазону міцностей від АС6 до АС400. Як наслідок, ми можемо займатися алмазно-абразивним інструментом для машинобудування (це алмази марок АС6–АС32), для каменеобробки (АС50–АС125), для бурового та породоруйнівного інструменту (АС100–АС160) та для високоточного правлячого інструменту (АС200–АС400). Все дозволяє мати госпдоговірні роботи не тільки з підприємствами України, але і мати контракти із підприємствами Болгарії, Молдови, Турції, Китаю. Надходять запити з Індії та Німеччини. Для підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту нині працюємо над застосуванням CVD-алмазів, модифікацією поверхні алмазних зерен оксидами та нітридами для їх теплового захисту. Крім усього іншого, нами розроблені ефективні процеси алмазно-абразивної обробки із застосуванням додаткових фізико-технічних впливів (плазмового і електрофізичного). Особливе значення надаємо розробці з переводу процесу алмазної обробки крихких матеріалів у пластичний режим, що дозволить зменшити енергоємність обробки. Важливим для досягнення цього є розробка адекватної оцінки енергоємності процесів алмазно-абразивної обробки, чого, на жаль, нині немає. Також важливим напрямком є дослідження умов збільшення тримальної здатності поверхні після алмазно-абразивної обробки, адже це значно підвищує зносостійкість обробленої поверхні виробу.



УДК 621.923

**В.І. Лавріненко**, д.т.н., професор, завідувач відділу,<sup>1</sup>

**В.В. Смоквина**, к.т.н., вчений секретар,<sup>1</sup>

**В.Ю. Солод**, к.т.н., доцент, перший проректор,<sup>2</sup>

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України<sup>1</sup>*

*Дніпровський державний технічний університет МОН України<sup>2</sup>*

## **НОВІТНІ НАПРАЦЮВАННЯ В ОТРИМАННІ ЗА ЗАСТОСУВАННІ ШОРСТКИХ ТА ПОРИСТИХ АЛМАЗІВ (ОГЛЯД)**

При розгляді питань алмазно-абразивної обробки, коли мова йде про зерна шліфпорошків алмазів в алмазному інструменті, то зазвичай їх розглядають як суцільний матеріал. Це в певній мірі справедливо для зерен алмазів високої міцності АС160–АС400, а ось для зерен невеликої міцності АС6–АС20, характерних для застосування в шліфувальному інструменті для машинобудування, звичайною є їх певна природна дефектність у вигляді певної поруватості та наявної шорсткості їх поверхні, що нами більш детально викладено у монографії [1].

В даній роботі ми основну увагу приділяємо питанням сучасних розробок (за останні 4 роки), пов'язаних із виявленням особливостей природної або спрямованої набутої дефектності зерен синтетичних алмазів, які є у науковій літературі [2–6].

В статті [2] показано, що пористі алмази мають унікальні перспективи застосування завдяки шорсткій розвиненій поверхні, великому співвідношенню площі поверхні до об'єму і високій здатності до самозаточування. Пористі алмази зазвичай отримують за допомогою методів мікрохвильового плазмохімічного осадження з парової фази (MPCVD) або шляхом травлення перехідними металами. В [2] повідомляється про досить простий та ефективний метод вирощування великих пористих монокристалічних алмазів міліметрового масштабу із застосуванням методів високого тиску і високої температури (HP-HT). Ріст пористих кристалів алмазу обумовлений мінімізацією поверхневої енергії за рахунок прикріплення маленьких кристалів до великої поверхні затравочного кристалу у металічному розчиннику.

В статті [3] доведено позитивні ефекти від застосування пористих алмазів. Звичайний алмаз має такий недолік, як погане самозаточування при шліфуванні. Крім того, він погано змочується керамічною зв'язкою, що призводить до меншого зчеплення зв'язуючого з алмазом. Для вирішення цих проблем в [3] методом термохімічної корозії був отриманий новий тип пористого алмаза з високими властивостями до самозаточування. Виявлено значне збільшення об'єму пор та питомої поверхні пористого алмаза, а також були поліпшені сила утримання та змочування пористих зерен керамічною зв'язкою (рис. 1). Пористі алмази значно збільшили ефективність і точність шліфування. Так, у порівнянні із звичайними алмазними інструментами

пористі показали підвищення ефективності шліфування на 29,6 %, зниження величини коефіцієнта шліфування на 15,5 % та шорсткості оброблюваної поверхні на 27,5 %, а також зменшення кількості подряпин на поверхні оброблюваної кремнієвої пластини [3].

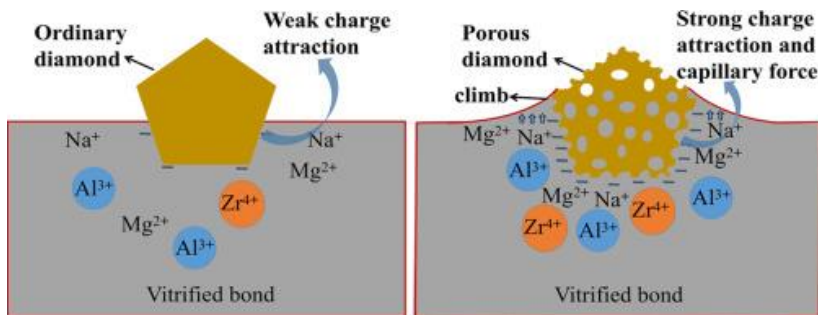


Рис. 1. Зміна особливостей змочування зерен пористих алмазів у керамічній зв'язці [3]

В роботі [4] звернена увага на збільшення величини міжфазної теплопередачі на таких шорстких (пористих) алмазах. Розуміння механізму міжфазної теплопередачі є ключем до поліпшення теплопровідності алмазно-мідних композитів. Алмазні частинки травилися розчином солі для отримання різної шорсткої поверхні, а надалі покривалися подвійними шарами вольфраму і міді. Надалі спіканням при гарячому пресуванні отримували композити алмаз/мідь. При шорсткості поверхні алмаза у 11,1 мкм, отримана максимальна теплопровідність  $602 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ , що на 12 % вище, ніж у неpotrаvлених композитів алмаз/мідь. Шорсткість значно збільшує площу контакту між алмазом і мідною матрицею, забезпечуючи більше каналів теплопередачі і вторинний процес теплопередачі на границі поділу алмаз /матриця. Таким чином, отримання композитів з високою теплопровідністю поліпшується за рахунок збільшеної шорсткості поверхні алмазних частинок.

В статті [5] надається приклад іншого впливу на поверхню алмазів для зміни шорсткості їх поверхні. З-за високої твердості і хімічної стабільності алмаза створення мікрорельєфу на його поверхні є певною проблемою. В даній роботі шляхом контактного травлення металом сферичного порошку титану на поверхні синтетичного алмазу були створені рівномірно розподілені мікрорисунки. Досліджений вплив розміру сферичних частинок і температури травлення на розмір і глибину мікрорисунків. Встановлено, що частка узорчатой області на поверхні алмаза зменшується із збільшенням розміру частинок сферичного порошку Ti. Але, як частка площі рисунку на поверхні алмаза, так і розмір та глибина візерунків збільшується із підвищенням температури травлення. Звернена увага на те, що травлення алмаза було досягнуто із застосуванням порошку Ti без появи графітизації алмаза. Це дозволяє досягти утворення

необхідних мікрорисунків на поверхні алмаза, що дозволить розширити області застосування алмаза [5].

Композитні покриття на основі Ni знайшли широке застосування в автомобільній, поліграфічній та аерокосмічній сферах. Однак численні важливі інженерні компоненти вимагають захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю. У дослідженні [6] було експериментально перевірено модифікацію морфології поверхні алмазу для підвищення зносостійкості композитних покриттів Ni-алмаз. Застосуванням методу термохімічної корозії отримано новий тип алмазу з шорсткою поверхнею, а композитне покриття Ni-алмаз (№ 2) і композиційне покриття Ni-алмаз з шорсткою поверхнею (№ 3) виготовлено методом електроосадження на постійному струмі (рис. 2). Дослідження свідчить, що алмаз із шорсткою поверхнею має більшу площу поверхні та вищу електронегативність, ніж звичайний алмаз, що покращує адгезію між зв'язком на основі Ni та алмазом із шорсткою поверхнею. Порівняно з покриттям №2 мікротвердість покриття № 3 було збільшено до 613 HV, а коефіцієнт тертя зменшено до 0,63. Завдяки синергетичному впливу підвищеної мікротвердості та міцності з'єднання швидкість зношування композитного покриття № 3 знизилася на 15,6%. Застосування алмазів з шорсткою поверхнею відкриває новий напрямок для розробки нових покриттів з високою зносостійкістю з широкими перспективами застосування.

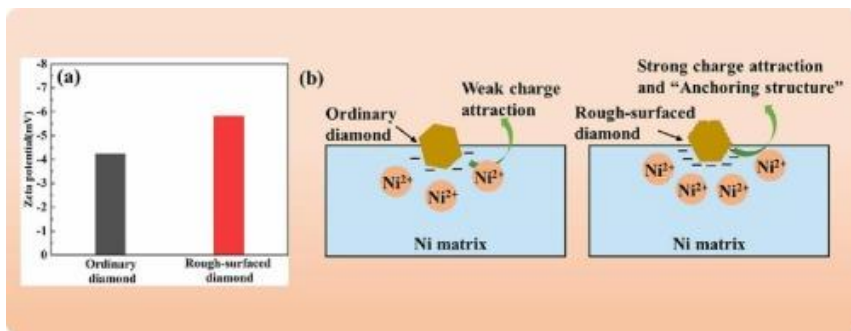


Рис. 2. Отримання композиційного покриття Ni-алмаз з шорсткою поверхнею

Наведені вище напрацювання дозволяють виявити і у подальшому застосовувати ефективні напрямки отримання і застосування шорстких пористих алмазів у шліфувальному інструменті.

### Література:

1. Ільницька Г.Д., Лавріненко В.І., Смоквина В.В. Алмази для шліфувального інструменту, отримані в різних системах / За редакцією д.т.н, професора Лавріненка В.І. – Київ: Наукова думка, 2021. – 167 с.

2. Porous single-crystal diamond / Junpu Wang, Yuzhu Su, Yi Tian, Xiaojun Xiang, Jiawei Zhang, Shuaiqi Li, Duanwei He // *Carbon*. Volume 183, 15 October 2021, Pages 259-266.

3. Research on the bonding properties of vitrified bonds with porous diamonds and the grinding performance of porous diamond abrasive tools / Jian-wei Li, Wen-jun Fang, Long Wan, Xiao-pan Liu, Wei-da Hu, Dan Cao, Kai Han, Ying-ying Li, Yong-gao Yan // *Diamond and Related Materials*. Volume 123, March 2022, 108841.

4. Effect of surface roughening on the interfacial thermal conductance of diamond/copper composites / Xinzhi Wu, Liyang Li, Wei Zhang, Manxin Song, Wulin Yang, Kun Peng. (2019) *Diamond and Related Materials*. V. 98. 107467.

5. Micropatterning of synthetic diamond by metal contact etching with Ti powder / Di Liu, Jian Zhao, Yuzhen Lei, Xiongyao Wang, Wei Fu, Xiaoguo Song, Weimin Long // *Diamond and Related Materials*. Volume 129, November 2022, 109299.

6. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification / Qiu Hong, Renchen Zhou, Xipeng Guo, Zhe Wang, Shaohui Yin. *Diamond and Related Materials*. Volume 137, August 2023, 110093.

УДК 621.9.048.6

**О.В. Шевченко**, д.т.н., професор,  
**С.А. Манзюк, Є.О. Стожаров**, студент,  
*Національний технічний університет України*  
*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

## **ВИКОНАВЧИЙ ПРИСТРІЙ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВЕРСТАТА**

Малі переміщення знаходять широке застосування для верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Такі переміщення необхідні, наприклад, у верстатах з позиційною системою ЧПК для точного позиціонування виконавчих механізмів в задану координату. У цих верстатах точність установки координат є їх однією з найважливіших технічних характеристик, і вона тим вища, чим менші величини переміщень можливі у верстаті. Мінімальне одиничне переміщення у верстаті з ЧПК обмежується дискретністю. Дискретність – межа теоретично можливої точності обробки на верстаті з ЧПК, тому чим менше дискретність, тим вища точність верстата. У високоточних верстатах малі переміщення використовуються для компенсації похибок, які виникають в технологічній оброблюваній системі внаслідок теплових та пружних деформацій, динамічних навантажень на холостих ходах та при різанні, зміни розмірного настроювання верстата та ін. При використанні систем автоматичного регулювання та автоматичної компенсації похибок відпрацьовуються малі підналагодувальні переміщення перед

початком та в кінці робочого циклу, а також і за результатами активного контролю та в процесі робочого циклу, що значно підвищує якість та продуктивність обробки.

Найчастіше у позиційних системах керування виконавчий орган переміщається традиційними механізмами подачі і лише поблизу заданої координати його точне позиціонування здійснюється механізмами мікроподачі. Використання традиційних електромеханічних систем для малих переміщень має ряд обмежень при роботі на наднизьких швидкостях подачі, що проявляється в нерегулярних коливаннях об'єкту позиціонування в напрямку руху та в істотному впливі нелінійностей кінематичних передач (люфти, сухе тертя, зони нечутливості та ін.), нехтувати якими в цих умовах неможливо.

Враховуючи те, що використання традиційних електромашинних виконавчих пристроїв позиціонування для мікроподач має обмежені можливості, треба переходити до нових конструктивних рішень, що долають вказані недоліки [1].

Аналіз технологічних можливостей прецизійних токарних верстатів та типових деталей, що обробляються на них, дозволяє встановити основні вимоги до пристроїв малих переміщень, а саме: - діапазон малих переміщень не перевищує 0,3 мм, що для лезового різального інструменту визначається критерієм зносу його різальних кромки; - точність позиціонування до  $0,3 \div 0,5$  мкм; - повторюваність при позиціонуванні не гірше 0,5 мкм; - жорсткість за напрямками дії складових сили різання не нижче  $10 \div 20$  Н/мкм; - лінійна залежність між переміщенням повзуна з різальним інструментом та вхідною дією в приводі; - відсутність люфтів та мертвих ходів при реверсуванні [2].

Основною складністю забезпечення точного позиціонування робочого органу є отримання малих переміщень при забезпеченні необхідної жорсткості передачі. Для позиціонування в мікро- та нанометричному діапазонах в приводах верстатів доцільно додатково використовувати спеціальні пружні кінематичні пристрої, що виконують функції пружних напрямних чи пружних шарнірів та виключають вплив зовнішнього тертя в останній передачі приводу на точність позиціонування.

На рис. 1 наведено конструктивну схему різцетримача для прецизійного позиціонування різального інструменту. Різцетримач складається з основи 1, що встановлена на супорті верстата, повзуна 2 з різцем 3, зв'язаного з основою 1 пластинами 4 з пружними шарнірами *A*, *B*, *C* і *D*, що утворюють пружний паралелограм та забезпечують пружний зв'язок між основою 1 та повзуном 2 [3].

Привод позиціонування повзуна 2 складається з кривошипно-повзунного механізму з пружно-деформівними шарнірами *E*, *F* і *G*, що забезпечують пружні зв'язки між основою 1 та кривошипом 5, між кривошипом 5 та шатуном 6 та між шатуном 6 та повзуном 2. Поворот кривошипу 5 довжиною *EF* забезпечує встановлена в ньому диференціальна гвинтова передача, що з'єднує гвинт 7 із кривошипом 5 та штовхачем, що утримується від повороту та контактує з опорною поверхнею основи 1. В процесі прецизійної токарної обробки переміщення вершини різця 3 в мікрометричному (нанометричному)

діапазоні в напрямку до оброблюваної поверхні здійснюється поворотом диференціального гвинта 7 на відповідний кут. Повзун 2 з різцем 3 зміщується відносно основи 1, згинаючи пружні напрямні 4 в шарнірах  $A, B, C, D$  та збільшуючи зусилля натягу в приводі. Відведення різця від оброблюваної поверхні здійснюється зворотнім обертанням гвинта 7. Різцетримач забезпечує високоточне позиціонування різця в мікрометричному (нанометричному) діапазоні в напрямку до оброблюваної поверхні та достатню жорсткість положення різця при точінні.

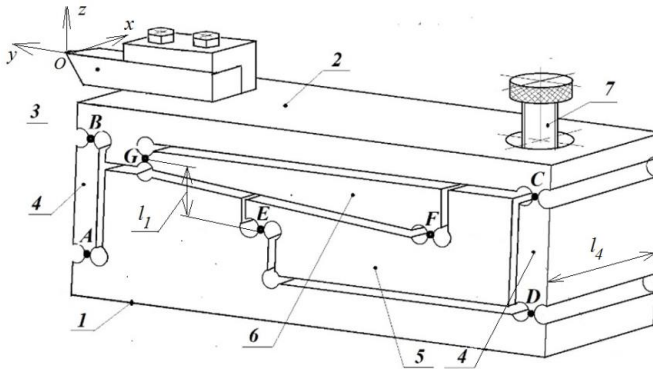


Рис. 1. Конструктивна схема різцетримача для прецизійного позиціонування різального інструменту

Важливим етапом при виборі розмірних характеристик пристрою є розрахунок передатного відношення, що зв'язує зміну кута  $\varphi$  повороту кривошипа  $EF$  з переміщенням різця в напрямку  $Oy$  при заданих розмірах  $l_1$ ,  $EF=l_2$  та  $GF=l_3$ . Для орієнтовного кінематичного розрахунку пристрою можна використати формулу для визначення переміщень в шарнірному чотириланковому кривошипно-повзунному механізмі [1]:

$$y = l_2 \cos \varphi + l_3 \sqrt{1 - \left\{ \frac{l_2 \sin \varphi + l_1}{l_3} \right\}^2} \quad (1)$$

Враховуючи те, що найбільший хід різця в напрямку  $Oy$  не перевищує 0,3 мм, розрахунок передатного відношення доцільно представити у вигляді відношення переміщення  $\Delta_{Oy}$  в напрямку  $Oy$  до переміщення точки  $F$  ( $\Delta_{\text{пр}}$ ) внаслідок обертання гвинта 7. Передатне відношення пристрою малих переміщень, розраховане за формулою (1), при початкових даних механізму:  $l_1 = 30$  мм,  $l_2 = 100$  мм та  $l_3 = 170$  мм має значення  $\Delta_{\text{пр}}/\Delta_{Oy} = 4,6$ . Збільшення передатного відношення в останній передачі від приводу до різця є конструктивною особливістю пристрою, що забезпечує точне регулювання положення різця в мікрометричному діапазоні. Використовуючи формулу (1) можна дослідити вплив геометричних параметрів пристрою на зміну

передатного відношення в приводі малих переміщень і розробити його раціональну конструкцію.

За результатами попереднього орієнтовного розрахунку визначено початкові дані для розробки твєдотільної моделі пристрою. На основі твєдотільної моделі методом скінченних елементів виконано уточнений розрахунок передатного відношення та визначено значення жорсткості конструкції в напрямках складових сили різання. За результатами розрахунків методом скінченних елементів визначено, що передатне відношення має значення  $\Delta_{\text{пр}}/\Delta_{Oy} = 6,2$ . Різниця у значеннях передатного відношення пояснюється тим, що у формула (1) не враховує пружні характеристики та деформації пружних шарнірів та ланок кривошипно-повзунного механізму приводу позиціонування. Разом з тим, такий рівень редуції в пружній частині приводу може забезпечити регулювання в мікрометричному діапазоні за допомогою диференціального гвинтового механізму, або перейти в діапазон нанометричного позиціонування при використанні пакетної конструкції п'єзоелектричного актуатора. Жорсткість запропонованої конструкції в напрямках складових  $P_x$ ,  $P_y$  та  $P_z$  сили різання складає:  $c_x = 60$  Н/мкм при  $l_4 = 60$  мм,  $c_x = 20$  Н/мкм при  $l_4 = 40$  мм,  $c_y = 50$  Н/мкм та  $c_z = 33$  Н/мкм. Зменшення товщини пристрою (розміру  $l_4$ ) суттєво зменшує жорсткість положення різця в напрямку осі  $Ox$ , однак дозволяє уникнути технологічних труднощів при виготовленні конструкції. Отримані характеристики задовольняють умові забезпечення точного позиціонування різця в мікрометричному діапазоні при необхідній жорсткості пристрою в точці прикладання сили різання.

Результати виконаних розрахунків та моделювання дозволили отримати достатню базу даних для розробки подібних конструкцій пристроїв малих переміщень для конкретних типів технологічного прецизійного верстатного обладнання.

### **Література:**

1. Шевченко О.В., Манзюк С.А. Пристрій мікропереміщень різального інструменту прецизійного токарного верстату / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта" – Київ-Херсон: 10-13.09.2019. с. 239-241.
2. Шевченко О.В., Манзюк С.А. Використання приводів нано- та мікропереміщень при ультрапрецизійній обробці на верстатах // Вісник ЖДТУ, Житомир, № 4 (67) / Серія: Технічні науки - 2013. с. 42-48.
3. Різцетримач: Патент України на винахід № 127294: МПК В23В 29/04. Опуб. 12.07.2023, Бюл. № 28. – 4 с. (автори Шевченко О.В., Манзюк С.А.).

**Л. Танович, д.т.н., професор,  
Машинобудівний факультет Белградського університету**

## **ПРОБЛЕМИ ІЗ ВПРОВАДЖЕННЯМ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ЗА БОЛОНСЬКОЮ МОДЕЛЛЮ**

**Вступ.** Характеристики сучасної світової та європейської економіки визначаються через: – формування сукупних товарних і фінансових потоків у світі на основі спільних рішень, ухвалених у кількох світових центрах; – лібералізацію потоків товарів і капіталу під тиском найпотужніших економік світу, з обмеженнями на вільне переміщення робочої сили; – гармонізацію, координацію та регіоналізацію економічної політики країн-членів різноманітних економічних і політичних угруповань.

Створюються всі передумови для переведення висококваліфікованих кадрів із низькоефективних підприємств і філій у високоефективні, тобто має місце перетікання професійних кадрів із менш розвинених підприємств, стан, континентів у більш розвинені. Паралельно капітал у вигляді інвестицій рухається в протилежному напрямку. Більш розвинені країни прагнуть інвестувати свій капітал у менш розвинені країни, де їхні природні багатства і дешева сировина являють собою сприятливі умови для отримання додаткових прибутків. Ба більше, цей рух капіталу супроводжується передачею брудних і шкідливих технологій із розвинених країн у менш розвинені.

Знання, що лежать в основі економічної системи, мають на увазі наявність освічених людей, які швидко вчаться і змінюють свої здібності відповідно до технологічного розвитку і тенденцій глобального розвитку.

З іншого боку, ми живемо у світі, який змінюється швидше, ніж будь-коли, і для якого характерні: – технологічні інновації; – опір змінам; – зростання населення; – зміна клімату.

Технологічна революція несе із собою дві основні проблеми: – потребує меншого залучення людського потенціалу; – вимагає наявність людей з іншим мисленням. Перше, безумовно, пов'язане з механізацією та автоматизацією процесів. Нова популяція людей має бути: – здатною постійно генерувати ідеї для нових продуктів і послуг; – здатною до гнучкої та швидкої адаптації до частих змін бізнес-середовища; – здатною кілька разів на життя усвідомлено змінити професію та місце роботи.

Небажання змін проявляється через перехідний процес, що зумовлений великою емоційною різницею між поколіннями, яка суттєво впливає на функціонування – старші мають досвід, вироблений в умовах вітчизняної економіки, а молодші зростають у європейському дусі згідно зі встановленими там правилами. При цьому, перехідний етап економіки слід розглядати як такий, що дає нові можливості для бізнесу, а не як загрозу.

Швидко зростання населення світу вказує на те, що планета стає дедалі більш заселеною – населення збільшується на більш ніж 200 000 жителів щодня.



Сьогодні ми зіштовхнулися з серйозними кліматичними змінами на планеті, для яких ми досі не маємо наукового обґрунтування походження, розвитку та передумов для запобігання.

**Сучасна система освіти.** Наскільки хороша чи погана теперішня система освіти, відповіді поки що немає, і це потребує, у кожному випадку, проведення відповідного аналізу та формування відповідей на такі запитання: – чи має університет свою політику та чітку місію; – яким є рівень академічної свободи та зловживань; – яким є обґрунтований профіль вишу; – чи є проблеми в структурі управління вишем; – чи є в університеті якісний професорсько-викладацький склад; – чи є переважаним роботою викладацький склад та чи нехтує він роботою, пов'язаною з дослідженнями; – чи є процес навчання за Болонською моделлю більш вимогливим; – чи пов'язана тенденція до зростання успішності студентів зі зниженням вимог або з кращим розвитком.

**Зловживання в університетах.** В університетах Сербії існує Кодекс професійної етики. Однак, його не завжди поважають учасники процесу навчання. Є приклади недотримання Кодексу студентами, викладачами, факультетами.

Приклади порушення професійної етики: – списування на іспиті (наушники для диктування, годинник, що прописує, мобільний телефон); – підготовка семінарських і графічних робіт, магістерських робіт..., дипломних і кандидатських дисертацій... за відповідну оплату.

**Управління університетом.** Існує кілька підходів до управління університетами: – англо-британська традиція (Оксфорд/Кембриджський підхід), що передбачає пошук порядку і свободи шляхом розвитку особистої відповідальності з акцентом на освіту і розвиток особистості за тісного спілкування професорів і студентів; – французька традиція (підхід Наполеона), яка передбачає задоволення соціальних потреб з акцентом на інновації та розвиток. Такий підхід являє собою сильну державну координацію освітніх організацій і програм навчання з розподілом наукових і гуманітарних університетів стосовно професійно-орієнтованих університетів; – німецька традиція (підхід Гумбольдта), що ґрунтується на принципах єдності викладання та дослідження, академічної свободи та інституціональної автономії; – традиція США являє собою комбінацію перерахованих вище моделей, але з іншим способом управління університетами та передбачає таке: місія університетів – це місія університетів.

**Проблеми освіти за Болонською моделлю.** Поширена сьогодні Болонська модель не вільна від низки проблем: – базове академічне навчання (3+2, 4+1 – ВАС) побудовано таким чином, що випускники володіють компетентностями тільки для певних професій, які можуть не викликати інтересу в роботодавців, і, таким чином, можливість працевлаштування випускників є обмеженою; – чимало учасників процесу позиціонують своє викладання в ВАС, остерігаючись можливої відсутності державного фінансування та невстановленого обсягу МАС, що ускладнює забезпечення норми навантаження.

**Питання впровадження інтегрованого навчання.** Гостро постає питання про ефективність Болонської системи. Вихід із неї може бути меншою шкодою, ніж збереження неефективної моделі. Чи має це викликати занепокоєння тих, хто навчається, чи викладацького складу?

Концепція результатів навчання спрямована на забезпечення та поліпшення якості вищої освіти й особливо актуальна в європейському освітньому просторі та являє собою вимірний результат досягнення цілей навчання. При цьому важливо визначитися, які програми навчання мають бути на інженерних факультетах і на які компетенції слід орієнтуватися – професійні компетенції: знання, навички та ефективність чи загальні компетенції, що забезпечують найкраще підґрунтя для адаптації у світі та до нових інноваційних технологій.

**Реформа освіти.** Реформа вищої освіти належить до великих структурних проєктів, розв'язання яких пов'язане із: забезпеченням фінансовими ресурсами, забезпеченням сучасним обладнанням, всебічним розвитком міжнародного співробітництва та, що неминуче, розпадом наявних університетів, що утруднює визначення місії та політики розвитку.

Крім згаданих проблем, необхідно враховувати такі, з якими можливо зустрінеться на етапі реформування: – недостатня підготовка старшокласників; – застарілі навчальні програми; – невідповідність ECTS-кредитів реальному навантаженню студентів; – помірна мобільність студентів і професорсько-викладацького складу; – відсутність зовнішнього оцінювання.

**Фінансування вищих навчальних закладів.** Вищі навчальні заклади по всій Європі стикаються зі складними фінансовими обставинами, за яких традиційний спосіб фінансування трансформується та розвивається: – державне фінансування в багатьох країнах уже не перебуває на тому рівні, що було раніше, і в багатьох випадках воно є більш вимогливим до конкурентоспроможності; – нинішня економічна та фінансова криза ще більше поглибила ці проблеми та зумовила питання стійкості режиму фінансування вищої освіти, тобто попиту на нові джерела доходу.

**Заключення.** Якість освіти має забезпечуватися високим рівнем викладання, а перевага викладання має ґрунтуватися на якісних дослідженнях. Сучасні освітні програми та постійне навчання за екологічно привабливими напрямками: – інформаційні та телекомунікаційні технології; – біомедицина та біотехнології; – наноматеріали; – нові матеріали; – нові джерела енергії; – екологія. Принципово більшого значення набуває інтернаціоналізація – з'єднання з міжнародними освітніми мережами як у сфері освіти, так і в галузі досліджень. При цьому гостро стоять питання реалізації більш ширших прав власності, особливо інтелектуальної.

УДК 62-231.311.2

**А.М. Шостачук**, к.т.н., доцент,  
**С.В. Мельничук**, к.т.н., доцент,  
**Б.В. Ємець**, к.т.н., доцент,  
*Житомирський агротехнічний фаховий коледж*

## ГРАФИ ТА ДЕЯКІ ЇХ ВЛАСТИВОСТІ МЕХАНІЗМІВ МАНІПУЛЯТОРІВ

Теорія графів – один з розділів дискретної математики, призначений для описання дискретних структур та їх властивостей. Сам граф, представляє собою сукупність точок (вершин), з'єднаних між собою лініями, які називають ребрами. Механізм  $I$ , є, власне, такою дискретною структурою (крім механізмів із змінною структурою), який складається з ланок, з'єднаних між собою в кінематичні пари, причому і ланки і кінематичні пари є незмінними об'єктами в розумінні забезпечення перетворення механічного руху при переході від однієї ланки до іншої.

Представити граф плоского важільного механізму можна кількома способами: зображувати у вигляді вершин ланки, а у вигляді ребер – дозволені рухи; представляти у вигляді вершин кінематичні пари, а у вигляді ребер – ланки, які утворюють ці кінематичні пари; нарешті, у вигляді вершин представляти структурні групи (групи Ассура), а у вигляді ребер – кінематичні пари, утворені ланками *різних* структурних груп. Оскільки плоскі важільні механізми утворюються саме приєднанням структурних груп до механізму  $I$  класу, то представлення графу такого механізму у вигляді сукупності вершин – структурних груп, з'єднаних ребрами – кінематичними парами, є найбільш інформативним, з точки зору описання структури механізму, і в той же час найбільш компактним. Як відомо, ступінь вільності структурних груп дорівнює нулю, а ступінь вільності механізму  $I$  класу дорівнює  $I$ , тобто на вході маємо один механічний рух з певними характеристиками, і на виході маємо також один рух з іншими, потрібними для виконання технологічних операцій, характеристиками.

При дослідженні механізмів маніпуляторів з метою побудови їх графів маємо принципово іншу картину. При приєднанні нових ланок до тієї ланки, яка утворює кінематичну пару зі стояком, ступінь вільності збільшується мінімум на  $I$  і вихідна ланка, на якій встановлено захват, призначений для захоплення та переносу в просторі інструмента або деталі (заготівки) має, як правило не менше трьох ступенів вільності. І, звичайно, вихідна ланка здійснює, зазвичай, більш складний просторовий рух, ніж це має місце для випадку вихідної ланки плоского важільного механізму, яка або здійснює простий рух (обертальний чи поступальний) або переміщується в площині, здійснюючи більш складний, плоско-паралельний рух. Таким чином, побудова графу механізму маніпулятора приєднанням до вхідної ланки структурних груп

не представляється можливим. Найбільш простим способом побудувати граф механізму маніпулятора є представлення ланок у вигляді вершин, а кінематичних пар, утворених цими ланками, – у вигляді ребер.

Розглянемо, наприклад, побудову графу механізму маніпулятора, зображеного на рис.1,а. Як видно, маніпулятор утворений стояком  $O$  та чотирма рухомими ланками 1-4. Рухомі ланки між собою та зі стояком утворюють наступні кінематичні пари: вертикальна частина 1.1 стержня 1 утворює зі стояком  $O$  обертальну пару  $V$  класу, також видно, що частина 1.1 обертається в площині рисунку. При цьому горизонтальна частина 1.2 стержня 1 обертається в площині, перпендикулярній площині рисунка. Ланка  $B$  утворює з горизонтальним стержнем 1.2 поступальну пару і переміщується вздовж цього стержня. Таким чином повзун  $B$  або точка  $C$  ланки 2 мають можливість знаходитись в будь-якій точці (в заданих межах відповідно конструкторських або технологічних вимог) площини, перпендикулярної площині рисунка. Наступні кінематичні пари  $C$  і  $D$  забезпечують переміщення захвату в будь-яку точку в площині рисунка (точніше, в заштрихованій площині ланок 2-4, рис.1,б). При цьому ланки 2 і 3, а також ланки 3 і 4 утворюють обертальні пари  $V$  класу. Таким чином, захват ланки 4 може зайняти будь-яке положення в просторі в залежності від виконуваних операцій і ми не можемо стверджувати, що він буде знаходитись в певній точці простору у визначений момент часу або при заданому куті повороту ланки 1, якщо її вважати за вхідну. На рис 1,б показано довільне розташування механізму маніпулятора в координатах  $x$ ,  $y$  та  $z$ , де координатами захвату  $3T$  є відповідно  $x_3$ ,  $y_3$  та  $z_3$ .

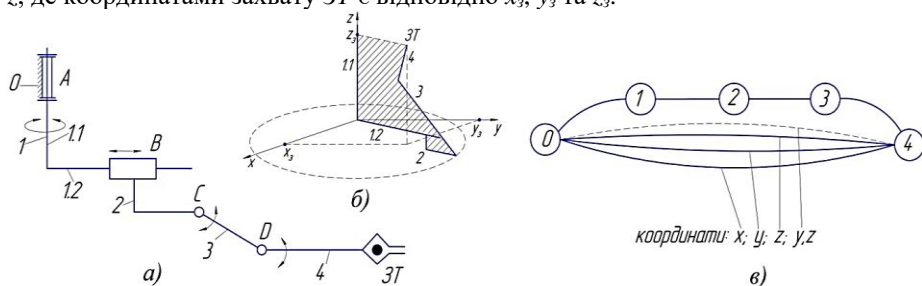


Рис. 1. Побудова графу механізму маніпулятора (а – механізм маніпулятора, б – координати захвату маніпулятора в декартовій системі координат, в – граф механізму маніпулятора)

Тобто, в першому наближенні граф маніпулятора можна представити як сукупність вершин, якими зображують ланки, та ребер, які відповідають дозволим рухам однієї ланки відносно іншої в кінематичній парі (рис.1,в). Якби ребрами зображували зв'язки (заборонені рухи ланок в кінематичній парі), тоді граф маніпулятора був би незамкненою фігурою, але якщо ребрами зображувати дозволені рухи, то можна ланки 0 та 4 зв'язати чотирма ребрами, які показують дозволені рухи (ступені вільності) вихідної ланки 4 (захвату)

відносно стояка 0. Якщо брати до уваги просторову декартову систему координат, ребер між ланкою 4 та стояком 0 повинно бути 3 відповідно осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , оскільки всіма рухомими ланками забезпечується переміщення захвату в системі саме трьох координат (на рис.1, в вони показані суцільними лініями, четверта лінія – координати  $y, z$ , які забезпечуються рухом ланок 3 та 4, показана штриховою).

Як бачимо, кількість всіх ребер, які з'єднують ланки 4 і 0, дорівнює 4, тобто кількості ребер, які з'єднують ланки 0-1, 1-2, 2-3 та 3-4. Таким чином, якщо всі кінематичні пари між ланками є парами V класу, то кількість ребер між поступально з'єднаними ланками, з одного боку, і між ланкою 4 (захват) та ланкою 0 (стояк), з другого, є рівними. Ця рівність відображає те, що маніпулятор має можливість досягати координати  $y$  як поступальною кінематичною парою, утвореною ланками 1 та 2, так і двома обертальними парами, утвореними ланками 2-3 та 3-4. Але часто в роботах та маніпуляторах зустрічаються, крім кінематичних пар V класу, кінематичні пари нижчих класів, наприклад кінематична пара IV класу вал-втулка (циліндрична пара), або сферичний шарнір (кінематична пара III класу). В будь-якому випадку сумарна кількість ребер (вільних координат) послідовно з'єднаних в кінематичні пари ланок повинна дорівнювати кількості ребер (ступенів вільності) між стояком і захватом:

$$N_{0-1-2-3-4} = N_{1-4}. \quad (1)$$

Далі, враховуючи, що розглядається положення захвату в декартовій системі координат  $(x, y, z)$ , можна визначити кількість координат, які забезпечуються різними кінематичними парами:

$$N_{II} = N_{1-4} - 3. \quad (2)$$

До інших властивостей графів механізмів маніпуляторів, які пропонується дослідити, віднесемо співвідношення між кількістю вершин та ребер, зв'язність, орієнтованість, тощо.

### **Література:**

1. Шостачук А.М. Графи плоских важільних механізмів. Науковий пошук молодих дослідників: збірник наукових праць студентів, магістрантів та викладачів / за заг. ред. Карплюк С.О., Вербівського Д.С., Єремєєвої В.М., Бенедисюк М.М., Толстової О.В. – Житомир : Вид-во ЖДУ імені І. Франка, 2019. – Вип. 12. С.99-102.

2. Мельничук С.В., Шостачук А.М. Графи структурних груп (груп Ассура) II та III класів плоских важільних механізмів. Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 152–155.

3. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. – К.: Наукова думка. – 2002. – 661 с.

4. Теорія графів. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерний моніторинг та геометричне моделювання процесів і систем» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»/ І.М. Кузьменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,7 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 71 с.  
[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia\\_hrafov.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafov.pdf)

УДК 621.787.4

**Я.Б. Немировський**, д.т.н.,  
**О.Л. Мельник**, к.т.н., доцент,  
**В.В. Огаманський**, старший викладач  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ**

**Вступ.** Відомо [1], що у теперішній час у виробництві деталей машин зайняті значні ресурси, які становлять близько 30% робочої сили та технологічного обладнання. Тому розробка нових методів відновлення деталей та їх поширення їх використання являється однією із важливих задач сучасного машинобудування.

Відновлення зношених деталей є дуже важливим резервом підвищення ефективності сучасного виробництва за рахунок економії матеріальних, паливо-енергетичних і трудових ресурсів. Економічна доцільність у відновленні зношених деталей зумовлена можливістю повторного використання до 80% працюючих деталей. Собівартість відновлюваних зношених деталей набагато нижча за вартість нових (не перевищує 50%). При цьому економиться матеріал виробу та енерговитрати на його виробництво [1-3].

Процес відновлення з огляду на свою специфіку (велика номенклатура форм і матеріалів, різноманіття способів відновлення) має багатоваріантність технологічних рішень, що застосовуються для усунення результатів зносу. Для однієї й тієї самої зношеної деталі можна розробити кілька варіантів технологічних процесів відновлення і вибрати найефективніший. Для об'єктивного вибору технологічного процесу відновлення необхідно оцінити переваги і недоліки кожного. Однією з найважливіших переваг методу відновлення є забезпечення параметрів якості відновлюваної деталі на рівні, не нижчому за нову [2, 3].

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України впродовж кількох останніх десятиліть проводилися глибокі дослідження процесу деформуючого та комбінованого протягування, що дало змогу одержати важливі наукові результати з механіки формозміни деталей і деформування робочого шару [4].

Відомо [4–5], що деформуюче протягування (ДПР) – технологічний процес обробки отворів методом холодного ступеневого пластичного деформування. При цьому інструмент переміщується вздовж утворюючої отвору за кінематичною схемою ковзання. Він застосовується як чистова, так і чорнова операція, поєднуючи в собі процеси формоутворення і деформаційного зміцнення.

Результати вивчення механіки формозміни при ДПР лягли в основу створення комбінованих технологій, що дають змогу забезпечити точність обробленого отвору за параметром еліптичності в межах  $\pm 0,02$  мм, а за кривизною твірної 0,15–0,3 мм на 1000 мм довжини деталі. Висотні параметри шорсткості забезпечуються в межах  $Ra = 0,05–0,15$  мкм, а опорна поверхня може становити 0,85–0,95%.

Проведені дослідження показали, що залежно від режимів протягування, геометрії інструменту, ступінь зміцнення поверхневого шару досягає 30–300%, а глибина зміцнення (наклепу) від 0,3 до 1 мм. Це дає змогу створити нові методи інженерії робочого шару, що підвищують експлуатаційні характеристики обробленої деталі.

Тому методи холодного пластичного деформування (ХПД) дають змогу забезпечити необхідний рівень параметрів якості робочої поверхні не тільки під час використання їх в основному виробництві [4–5], а й при використанні їх при відновленні зношених деталей. Безсумнівними перевагами використання для цього процесу методів ХПД [4, 6] перед іншими методами відновлення являється наступне:

- не порушується суцільність оброблюваного матеріалу;
- дає змогу покращувати фізико-механічні властивості матеріалу виробу в необхідних місцях і обсягах;
- дозволяє реалізувати схему формоутворення зношеної деталі, що дозволяє направити необхідний об'єм матеріалу деталі в місця зносу для його компенсації;
- легко поєднується з термічними і хіміко-термічними операціями, створюючи при цьому гібридні технології;
- характеризуються поліпшеною технологічною спадковістю, що дає змогу зберегти параметри якості, які позитивно впливають на експлуатаційні характеристики деталей, навіть у разі використання додаткових нових фінішних операцій;
- не створюють негативного впливу на навколишнє середовище;
- легко підлягають автоматизації, що забезпечує застосування методів ХПД при відновленні деталей в умовах крупносерійного виробництва.

Створення технологій відновлення зношених деталей із застосуванням пластичного деформування має базуватися на вивченні елементів механіки пластичного деформування оброблюваних виробів, що дасть змогу технологічно створити необхідний напружено-деформований стан (НДС). Своєю чергою, створення необхідного НДС забезпечить необхідну пластичну течію в напрямку до зношених ділянок виробу, що компенсує величину зносу та забезпечить необхідний припуск під подальшу механічну обробку.

**Результати дослідження.** Для прикладу розглянемо відновлення віссиметричних деталей типу втулок, під час якого можна використовувати відому операцію обробки отворів – деформуюче протягування [4, 5].

Більш того, застосування гібридних технологій на основі деформуючого протягування дозволяє поєднувати переваги різних методів, у тому числі модифікації поверхні, нанесення покриттів, хіміко-термічну обробку, що дає можливість досягнути більш високих експлуатаційних властивостей відновлених деталей. Ці можливості вимагають подальшого дослідження та уточнення.

Тому ці методи зведемо в схему, що ілюструє шляхи розв'язання цієї задачі. Це дало змогу використати зазначені переваги при створенні комбінованих технологій на основі деформуючого протягування, що в свою чергу поліпшило експлуатаційні характеристики відновлених виробів (рис. 1).



Рис. 1. Схема створення нових технологічних методів інженерії поверхні на основі деформуючого протягування, які покращують експлуатаційні властивості відновлених деталей

Як слідує з рис. 1, відновлення методами ХПД розширює діапазон параметрів, що сприятливо впливають на експлуатаційні характеристики відновлених деталей. Так, при використанні деформуючого протягування до відомих параметрів, що характеризують фізико-механічні та геометричні характеристики робочого шару відновленої деталі, додається такий параметр як формування деталі, який дозволяє забезпечити не тільки збільшення



зношеного діаметру деталі, але і забезпечити необхідний осьовий розмір відновленої деталі. Це усуває включення додаткових операцій по досягненню необхідного осьового розміру.

Крім того, використання способу відновлення на основі ДПР дозволяє використовувати такий контрольований параметр фізико-механічних характеристик, як ресурс пластичності, який свідчить про накопичення пошкоджень обробленої поверхні і сприятливо впливає на подальші термічні та хіміко-термічні операції, необхідних для відновлених деталей.

Використання цієї схеми дає змогу розробити технологічний процес відновлення робочої поверхні зношених вісесиметричних деталей типу поршневий палець двигунів внутрішнього згорання.

### **Література:**

1. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. – Полтава, 2019. – 201 с.
2. Стецько А.Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. – Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. – 240 с.
3. Лузан С.А. Критерії вибору способу відновлення деталей машин та визначення раціонального маршруту технологій / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. 2017. Вип.183. – С.45–56.
4. Rosenberg, A.M., Rosenberg, O.A. Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching. Kyiv, Naukova dumka, (1990).
5. Інженерія деталей, оброблених протягуванням [Текст] / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Є. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський / ІНМ ім. Бакуля НАН України, ЦНТУ МОН України, Кропивницький: видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.
6. Sheykin, S.Y., Grushko, O.V., Melnichenko, V.V. et al. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. J. Superhard Mater. 43, 222–230 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1063457621030096>.

УДК 621.914

**Ю.В. Петраков**, д.т.н., професор,  
**О.А. Охріменко**, д.т.н., професор,  
**М.О. Сікайло**, аспірант,  
**А.В. Мигович**, аспірант

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

## МОДЕЛЮВАННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Моделювання сили різання при кінцевому фрезеруванні складає основу для прогнозування стабільності процесу, виявлення похибок і аналізу формування поверхні деталі [1]. Особливе значення передбачення сили різання має при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей, в обробній системі малої жорсткості, що широко використовуються в аерокосмічній та автомобільній промисловості [2]. Ясно, що без адекватної моделі сили різання при фрезеруванні таких деталей неможливо вирішити задачу оптимізації. Тому розроблення математичних моделей залежності сили різання від режиму різання і створення надійних методів моделювання є актуальною задачею загальної проблеми оптимізації кінцевого фрезерування.

Для моделювання сили різання при кінцевому фрезеруванні була створена прикладна програма в основу якої покладений механістичний підхід до розрахунку сили різання за визначенням геометричних параметрів недеформованої стружки кожним зубом на його довжині. Така модель створена за геометричними співвідношеннями схеми, де представлена розгортка лез фрези за осьюою координатою в графічному вікні прикладної програми (рис. 1).

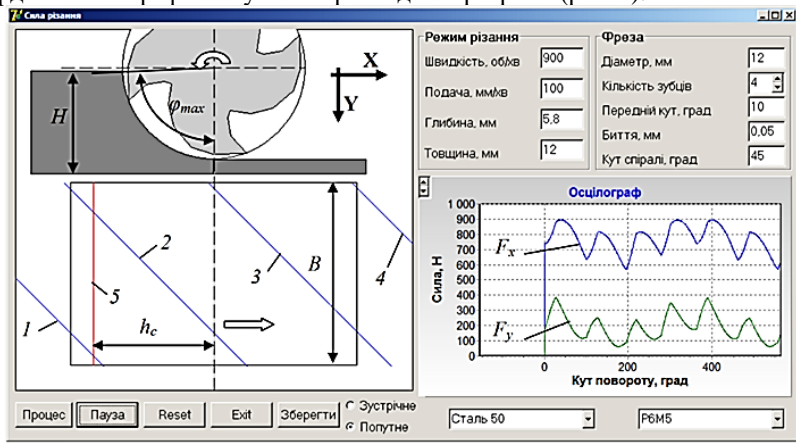


Рис. 1. Інтерфейс прикладної програми при моделюванні попутного фрезерування

На схемі показані положення різальних лез фрези, яка має чотири леза за шириною  $B$  різання – лінії 1, 2, 3 і 4. Леза вступають у взаємодію з заготовкою в діапазоні дуги різання. На розгортці така зона обмежується лінією 5 на відстані від початку різання  $h_c = R_m \cos(\varphi_{\max})$ . При моделюванні виконується анімація і положення лез на розгортці змінюються при обертанні фрези за кутом.

У відповідності з розташуванням проєкцій різальних лез на схемі, взаємодіє з заготовкою лезо 1 і 2 на відстані від перетину з лінією 5 до ширини  $B$ . При цьому кут  $\varphi$  різання змінюється від  $\varphi_{\max}$  до нуля. Ясно, що при зміні ширини, глибини різання чи кількості зубців фрези така картина буде змінюватись – більше різальних спіралей будуть приймати участь у різанні. Такий процес ураховується застосуванням розроблених математичних моделей та обчислювальних процедур.

Для визначення сили різання та її складових були розроблені формули, що передбачають інтегрування чисельним методом за двома напрямками – за лезом, що ріже і в ньому за довжиною лінії різання. Отже, окружна сила різання визначається як сума сил, які діють на лезах, що ріжуть, а за кожним лезом за елементарними відстанями  $\delta B$ , а її складові за осями координат визначаються з геометричних співвідношень розташування у вибраній системі координат (рис. 1). Для розрахунку сили різання і її складових використаний механістичний підхід, проте з використанням емпіричних залежностей, коефіцієнти і показник ступеня в яких визначався за довідниковими даними [3].

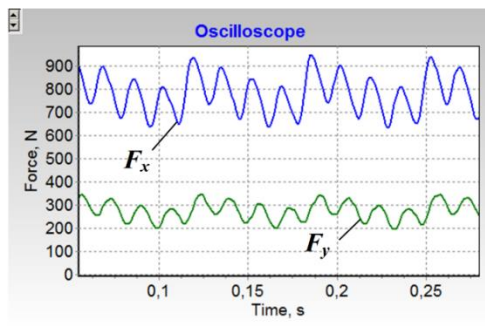
В результаті моделювання у вікні віртуального осцилографу поступово, з виконанням обчислень за зміною кута повороту фрези, з'являються графіки складових  $F_x$  і  $F_y$  сили різання у функції кута повороту. Можна спостерігати вплив биття фрези на характер зміни графіків та різницю у формі складових сили різання при зустрічному і попутному фрезеруванні.

Підтвердження отриманих результатів було отримане при натурному експерименті. Відповідні експерименти були виконані при фрезеруванні заготовки зі Сталі 50 кінцевою фрезою  $\varnothing 12$  мм, матеріал P6M5 з покриттям TiAlCrN, твердість HRC 65. Фреза має чотири спіральних леза з нахилом  $45^\circ$ . Заготовка була закріплена на столі трикомпонентного динамометра MCS 10-005-3C фірми HBM Germany (рис. 2, а). Сенсори трикомпонентного динамометра під'єднані до підсилювачів SlipX VM40 фірми HBM, що в свою чергу під'єднані до ПК з відповідним програмним забезпеченням для реєстрації сигналів. Експерименти проводились на верстаті XYZ VMC 1010 з системою ЧПК Siemens 810D.

Експерименти виконувались при попутному фрезеруванні заготовки на режимах різання в зоні середніх і високих швидкостей. Причому ширина і глибина фрезерування гарантували різання одночасно декількома лезами фрези для перевірки адекватності функціонування створеного алгоритму фрезерування на тих самих режимах. В результаті на ПК були записані цифрові файли, що відповідають складовим сили різання, які за допомогою спеціальної програми представлені у формі графіків (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Верифікація результатів:  
а) експериментальний стенд,  
б) осцилограми

Аналіз отриманих результатів показує на досить добрий збіг експериментальних і теоретично прогнозованих складових сили різання на різних режимах, що в цілому підтверджує адекватність розробленої моделі. Середні величини складових сили різання за даними експериментів і моделювання повністю збігаються, що підтверджує вірний вибір емпіричних коефіцієнта і показника ступеня в формулах сили різання.

Слід зауважити, що умови фрезерування при обробленні деталей авіаційної і автомобільної промисловості є квазістаціонарними в наслідок контурної обробки. Тому застосування запропонованих у відомих роботах [4] моделей не гарантує адекватний результат. Створений алгоритм і програмне забезпечення здатне моделювати такі процеси завдяки новому підходу, що урахує можливість різання одночасно декількома лезами. Така особливість визначає практичну корисність дослідження і гарантує адекватність прогнозування сили різання при контурному кінцевому фрезеруванні, що важливо для оптимального призначення режиму різання на таких операціях.

### Література:

1. Aydın M, Köklü U. Analysis of cutting forces from conventional to high-speed milling with straight and helical-flute tools for flat-end milling incorporating the effect of tool runout. (2021) <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-850919/v1>
2. Shrikrishna Nandkishor Joshi, Gururaj Bolar. Influence of End Mill Geometry on Milling Force and Surface Integrity While Machining Low Rigidity Parts J. Inst. Eng. India Ser. C (December 2021) 102(6):1503–1511 <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00608-0>
3. Machining handbook - 2-part EN <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/know-how/machining-handbook/e/61245/>

4. Budak E. Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity / International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1478–1488 doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009

УДК 621.923

**О.О. Буріков**, аспірант,  
**Д.Ю. Джулій**, к.т.н, доцент,  
**В.С. Майборода**, д.т.н., професор,  
*Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"*

## **МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ 40Х ТОРЦЕВИМИ ІНДУКТОРАМИ НА ОСНОВІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

Попередні дослідження процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) плоских феромагнітних деталей, виконаного з використанням спеціальних торцевих головок на основі постійних магнітів великої потужності показали можливість суттєвого зменшення параметра Ra до рівня 0,03–0,05 мкм після операції торцевого фрезерування [1–5]. На прикладі оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45 встановлено основні закономірності, які відбуваються з поверхнею при МАО в залежності від технологічних параметрів процесу, конструкції торцевих магнітних головок. Показано, що одним з найважливіших факторів, який впливає на ефективність фінішного оброблення є величина магнітного зазору, яка безпосередньо визначає рівень магнітної індукції в зоні оброблення, особливості структурування магнітного-абразивного інструменту, умови взаємодії з оброблюваними поверхнями. При цьому важливим чинником, що впливає на можливість отримання низьких значень параметру Ra після МАО є вихідний стан поверхні, окремі елементи хвилястості, які формуються в процесі фрезерування. В роботі було досліджено вплив технологічних параметрів процесу МАО плоских поверхонь зразків зі сталі 40Х після торцевого фрезерування. Стан поверхні зразків перед операцією МАО представлено на макрофотографії поверхні при збільшенні  $\times 10$ , і отриманої на ділянці 2x2 мм на мікроскопі NanoFocus (рис. 1).

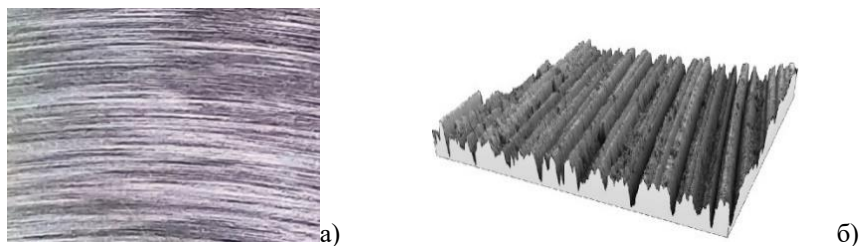


Рис 1. Макрофотографія фрезерованої поверхні при збільшенні  $\times 10$  – (а) та отриманої на мікроскопі NanoFocus – (б)

Оброблення виконували порошком Феромап з розмірам частинок, які змінювали в діапазоні від 100 до 630 мкм, при зміні величини магнітного зазору від 1 до 4 мм при швидкості обертання робочої головки навколо власної осі – 900 об/хв. за рекомендаціями наведеними в [1–3]. Характер зміни параметру  $R_a$  після MAO в залежності від зазначених вище технологічних параметрів наведено на рис. 2 у вигляді топограми поверхні. Показано, що найменші значення величини  $R_a$  формуються при MAO з використанням порошку з розміром частинок 630/400 мкм і робочому зазорі величиною 2–3 мм, що підтверджує попередні дослідження. Важливим є аналіз макрофотографій отриманих поверхонь після оброблення з різними робочими зазорами (рис. 3).

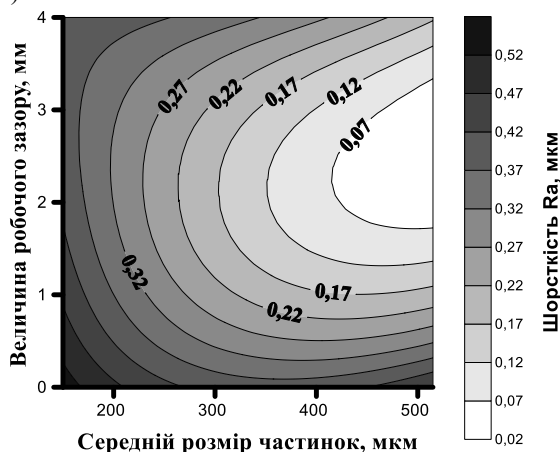


Рис. 2. Характер зміни параметру  $R_a$  від середнього розміру частинок магнітно-абразивного порошку Феромап і величини робочого зазору після MAO

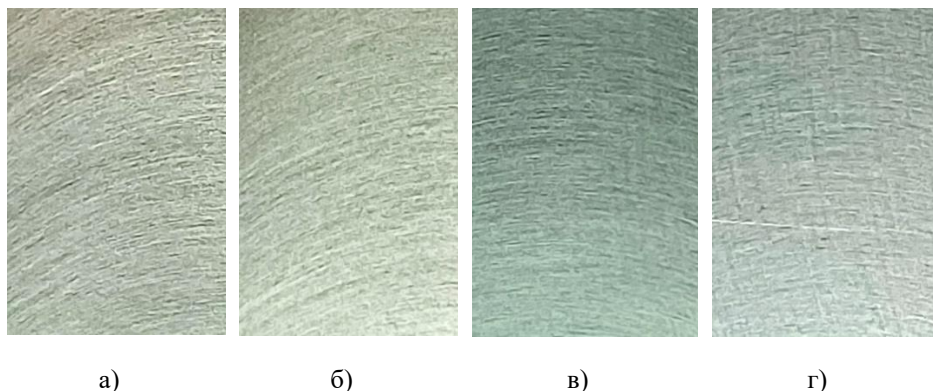


Рис. 3. Макрофотографії оброблених методом MAO поверхонь при збільшення  $x10$  з робочими зазорами: 1 мм – а), 2 мм – б), 3 мм – в) і 4 мм – г)

Аналіз отриманих зображень свідчить про те, що при використанні робочих зазорів 3 та 4 мм зберігається спадковість оброблення, отримана на стадії торцевого фрезерування. Вигляд поверхні після MAO з робочим зазором 2 мм отриманої на ділянці 2x2 мм на мікроскопі NanoFocus, дискретний і інтегральний характер розподілення висоти мікронерівностей на наведеній ділянці представлено на рис. 4.

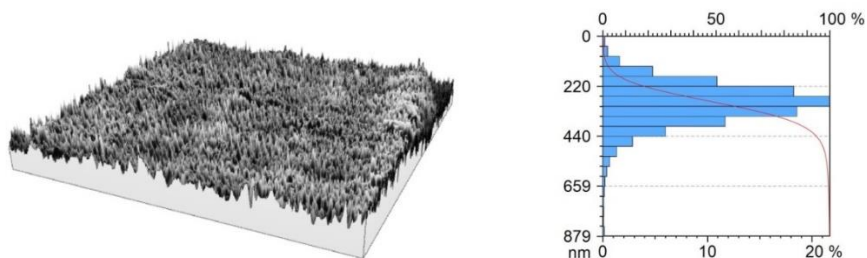


Рис. 4. Поверхня після MAO з робочим зазором 2 мм отриманої на ділянці 2x2 мм на мікроскопі NanoFocus, дискретний і інтегральний характер розподілення висоти мікронерівностей на наведеній ділянці

Потрібно відзначити, що після MAO з робочим зазором 1 мм починають проявлятися елементи шаржування магнітно-абразивного порошку в оброблювану поверхню, аналогічно результатам наведеним в [1].

### Література:

1. Maiboroda V.S. AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method. /V.S. Maiboroda, O.O. Belajev, D.Yu. Dzhulii, I.V. Slobodianiuk// *Journal of Engineering Sciences*. – 2020. – Vol.7(1), p. A1–A7. DOI: 10.21272/JES.2020.7(1).A1.
2. Maiboroda V.S. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads 1. The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magneto-abrasive machining /V.S. Maiboroda, D.Yu. Dzhulii, A.I. Zelinko// *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – Том 89, № 2 (2020), с.121–130. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202696>.
3. Maiboroda V.S. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2.The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining /V.S. Maiboroda, D.Yu. Dzhulii, A.I. Zelinko, A.O. Burikov// *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – Том 90, № 3 (2020), с. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.208535>.
4. Zelinko A. Influence of Process Parameters and Initial Surface on Magnetic Abrasive Finishing of Flat Surfaces on CNC Machine Tools /A. Zelinko, F. Welzel, D. Biermann, V. Maiboroda// *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2021. – Volume 5, Issue 4, 108. – p.2–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040108>.
5. Zelinko A. [Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools](https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5) /A. Zelinko, F. Welzel, D. Biermann, V. Maiboroda// *Production Engineering* – 2022. – №4, p.523–533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5>.

УДК 678.686:621.7.079

**С. Є Шейкін.**, д.т.н., професор, завідувач відділу,  
**І. Ю. Ростоцький**, к.т.н., старший науковий співробітник,  
**В. С. Гаврилова**, к.т.н., старший науковий співробітник,  
**О. А. Микищенко**, молодший науковий співробітник,  
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

### ОДЕРЖАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАСТИЛА ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ПАЗІВ В ТРУБЧАСТИХ ВИРОБАХ ДЕФОРМУЮЧИМ ПРОТЯГУВАННЯМ

Деформуюче протягування (ДП) (дорнування) – процес обробки отворів в деталях методом холодного ступінчастого пластичного деформування. В залежності від технологічних умов ДП контактний тиск в зоні взаємодії



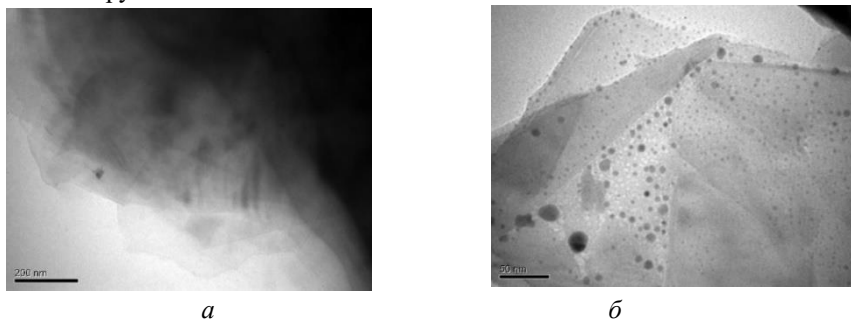
інструменту та оброблюваного виробу може сягати  $9\sigma_T$  ( $\sigma_T$  – границя плинності) оброблюваного металу.

За цих умов реалізація процесу ДП можлива лише при використанні технологічних мастил (ТМ), які подаються в зону деформації на контактуючі поверхні інструменту та заготовки. ТМ в комплексі з оксидними плівками створює проміжне тіло, яке запобігає схоплюванню інструменту з оброблюваним матеріалом. При наявності розділової мастильної плівки деформація металу відбувається за участю ТМ.

Метою даної роботи було одержання ефективного технологічного рідкого мастила для обробки деталей із конструкційних легованих сталей методом ДП на основі встановлення особливостей структуроутворення отриманих матеріалів з використанням електронної мікроскопії та визначення впливу введення антифрикційного наповнювача та наноструктурного компонента на коефіцієнт динамічної в'язкості мастила.

До мастильної зв'язувальної основи, сформованої з органічних сполук, вводили наноструктурні неорганічні компоненти [1], а також антифрикційний наповнювач (в даній роботі використали колоїдний графіт). Введення наноструктурних складників забезпечує рівномірний розподіл частинок зв'язувальної основи за рахунок протидії їхній агломерації.

За одночасного введення наноструктурних компонентів та антифрикційних наповнювачів спостерігається зміна в характері агрегації та розподілу останніх в органічній основі. Порівняння композиції без додавання наноструктурного складника (рис. 1 а) з системою, яка містить добавки такого складника (рис. 1 б), вказує на рівномірне розташування останнього відносно частинок антифрикційного наповнювача та сприяння в створенні більш «розпушеної» структури за рахунок ексфоціації шарів наповнювача. Формування такої структури може сприяти позитивним змінам антифрикційних властивостей за рахунок покращення взаємного ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень.



*Рис. 1. ТЕМ-зображення структури частинок антифрикційного наповнювача в мастильній композиції без (а) та при додаванні наноструктурного неорганічного компонента (б)*

Одночасне введення наноструктурних неорганічних компонентів і антифрикційних наповнювачів впливає також на в'язкість рідкого мастила. Для визначення динамічної в'язкості  $\beta$  було проведено реологічні вимірювання трьох зразків мастила (табл.). Вимірювання проводили на ротаційному реометрі моделі AR 2000 в режимі течії в діапазоні швидкостей зсуву  $1,25\text{--}125\text{ c}^{-1}$  за температур 20, 40, 60, 80, 100 °С.

Введення добавок до рідкого мастила найбільш суттєво змінює в'язкість за кімнатної температури, причому одночасне додавання антифрикційного наповнювача і наноструктурного компонента її підвищують (рис. 2). В той же час підвищення температури веде до зменшення в'язкості всіх зразків мастила, а також до зближення їхніх значень за високих температур.

Одержані температурні залежності описуються рівнянням Арреніуса  $\beta = \beta_0 \exp(E_a/RT)$ , де  $\beta_0$  – передекспоненційний множник, який не залежить від температури,  $E_a$  – енергія активації процесу течії,  $R$  – універсальна газова стала. В таблиці наведено значення  $\beta_0$  та  $E_a$  для досліджених мастил.

Таблиця. Склад та характеристики динамічної в'язкості рідких мастил

№ зразка	Склад	$\beta_0$ , Па·с	$E_a$ , кДж/моль
1	Мастильна зв'язувальна основа	$4,38 \cdot 10^{-9}$	56,38
2	Мастильна зв'язувальна основа + антифрикційний наповнювач	$7,80 \cdot 10^{-8}$	48,83
3	Мастильна зв'язувальна основа + наноструктурний неорганічний компонент + антифрикційний наповнювач	$1,782 \cdot 10^{-5}$	36,02

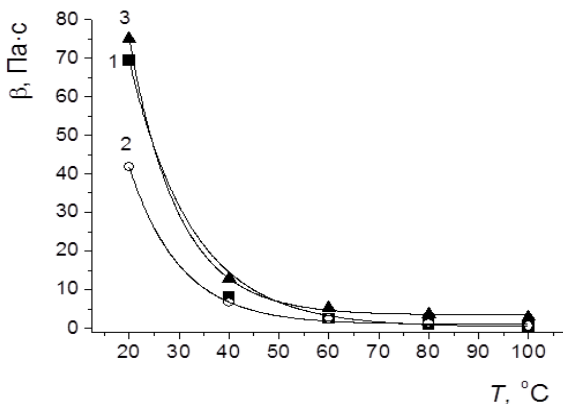


Рис. 2. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості рідких мастил від температури: 1 – 3 склад мастил (див. табл.)

Наведені дані показують, що введення наноструктурного компонента в поєднанні з антифрикційним наповнювачем досить суттєво змінює характер температурної залежності коефіцієнта динамічної в'язкості мастила: передеспоненційний множник збільшується на 4 порядки, а енергія активації зменшується в 1,5 рази, тобто ця операція приводить як до значного збільшення температурно незалежного коефіцієнта в'язкості, так і до суттєвого зменшення впливу температури на в'язкість мастила.

Це означає, що сформований в мастилі структурний каркас з наночастинок є досить міцним і забезпечує можливість ефективної експлуатації розробленого мастила за більш високих температур. Характер взаємодії та взаємного розташування компонентів системи також сприяють посиленню антифрикційних властивостей розробленого мастила за рахунок покращення взаємного ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень.

Було проведено обробку внутрішніх складнопрофільних отворів в деталях зі сталі 38Х2МЮА (*HRC* 29...30), діаметром 29,4 мм. Вихідні значення шорсткості за параметром *Ra* становили 3,41 мкм.

Визначено вміст колоїдного графіту в мастилі, який дозволив провести обробку без ознак схоплювання (табл., зразок 2), та забезпечив необхідну шорсткість поверхні. На виступах профілю *Ra* 0,506...0,783 мкм, на западинах *Ra* 0,239 мкм.

При цьому загальна осьова сила становила 274 кН. Для зменшення сили тертя необхідно підвищити адгезію мастила до металу та покращити взаємне ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень. Це досягається за рахунок введення до описаної вище мастильної композиції наночастинок органосиланів (зразок № 3).

При використанні зразка мастила № 3 зі структурючим агентом (наночастинками) значення шорсткості по виступах (*Ra* 0,603 мкм) і западинах (*Ra* 0,108 мкм) були нижчими, ніж при використанні зразка мастила № 2, а загальна осьова сила становила 210 кН, тобто введення до мастильної композиції наночастинок дозволило знизити на 23 % силові параметри процесу.

Таким чином, запропоновано мастильну композицію, яка під час обробки ДП для формування круглих та складнопрофільних внутрішніх поверхонь деталей сталей 38Х2МЮА, дозволяє знизити осьове навантаження на 23 % та отримати оброблену поверхню на рівні 10-11 класу.

### **Література:**

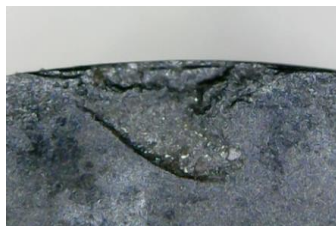
1. Пат. на винахід 107527 Україна, МПК, С10М 175/00 С08L 63/00. Антифрикційний матеріал для холодної обробки металів тиском / В.С. Гаврилова, В. М. Михальчук, С. В. Жильцова, Т. І. Григоренко, І. Ю. Ростоцький, С. Є. Шейкін, Є. О. Пащенко, О. М. Кошкін; заявник і патентовласник – Інститут надтвердих матеріалів НАН України. Заявл. 24.07.13. Опубл. 12.01.2015. Бюл. № 1.

УДК 621.9.025

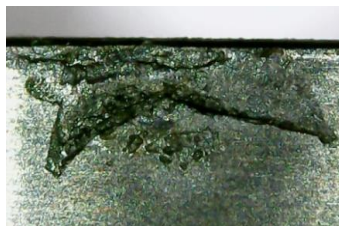
**С.Ан. Клименко**, к.т.н., ст. дослідник,  
**С.А. Клименко**, член-кор. НАН України, д.т.н., професор,  
**А.С. Манохін**, к.т.н., ст. дослідник,  
**Ю.О. Мельнійчук**, к.т.н., с.н.с.,  
**А.О. Чумак**, к.т.н.,  
**М.Ю. Копейкіна**, к.т.н., с.н.с.,  
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України*

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПКНБ ГРУПИ VL ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ІЗ ДИНАМІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Композити на основі полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) групи VL відносяться до надтвердих матеріалів із низьким вмістом нітриду бору – 40-65 об.%. Відмінність в хімічному складі і фізико-механічних властивостях ПКНБ групи VL обумовлює особливості їх ефективного використання в порівнянні із композитами із високим вмістом BN – група VH (90-95 об.%). Інструменти виготовлені на основі ПКНБ групи VL дозволяють проводити ефективну чистову безударну обробку важкооброблюваних матеріалів зі швидкостями різання 150-210 м/хв, що у два рази вище ніж при використанні інструментів із ПКНБ групи VH. В ІНМ НАН України розроблена широка гама ПКНБ групи VL з матричними матеріалами TiC, TiN та TaN. При проведенні стійкісних досліджень під час обробки загартованої сталі ХВГ (62 HRC) найбільш ефективними виявилися інструменти з композитом складу cBN-TiC 55-45 об. %, що пов'язано з більш однорідним структурним станом матеріалу. При цьому встановлено, що наявність навіть малих динамічних навантажень, викликаних тріщиною в оброблюваній заготовці, призводить до катастрофічного руйнування різальної кромки (рис. 1) на швидкості різання 250 м/хв. Причина низької стійкості різальних інструментів із ПКНБ групи VL пов'язана із нижчими механічними властивостями ( $HV_{0,5}$  37,1 ± 4,2 ГПа; межа міцності при стиску 3100 МПа) в порівнянні із ПКНБ групи VH ( $HV_{0,5}$  40,0 ± 2,3 ГПа; межа міцності при стиску 3500 МПа).



*a*



*Б*

*Рис. 1. Контактні ділянки передньої (а) та задньої (б) поверхні інструменту із композиту cBN-TiC 55-45 об. % після точіння сталі ХВГ (62 HRC) ( $v = 250$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм,  $T = 2,3$  хв)*

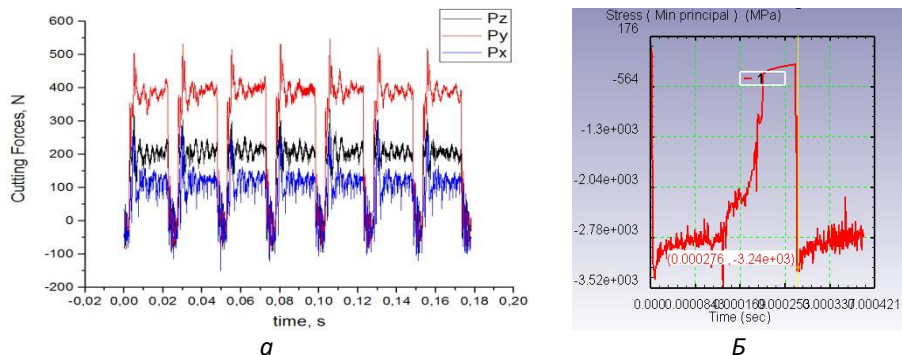


Рис. 2. Сили різання (а) та величина третіх головних напружень (б) у залежності від часу різання ( $v = 120$  м/хв,  $t = 0,4$  мм,  $S = 0,1$  мм/об)

При цьому, на працездатність інструменту впливає наявність при обробці із динамічними навантаженнями всплеску складових сили різання, що збільшує пікове навантаження на різальну кромку (рис. 2, а).

Моделювання переривчастої обробки методом КЕ (рис. 2, б) показує, що в точці входу леза в оброблювану поверхню в небезпечній точці на поверхні різця зростання третіх головних напружень досягає значення  $-3,24$  ГПа, що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в межах ділянки, на якій реалізується різання в 1,2 рази. Хоча номінальне значення межі міцності на стиснення ПКНБ вище, зважаючи на дисперсію властивостей композиту, ймовірність їх руйнування в розглянутих умовах досить висока.

На основі отриманих даних з моделювання контактних напружень та величини границі міцності під час стиску композитів із ПКНБ групи VL розраховано ймовірності руйнування інструментів при обробці з динамічними навантаженнями. Встановлено, що ймовірність руйнування інструментів із ПКНБ групи VL –cBN-TiC (55–45 об.%) складає 68,9 % (рис. 3, а).

Одним із шляхів підвищення стійкості інструментів із ПКНБ групи VL при обробці із динамічними навантаженнями є створення зміцнюючої радіусної фаски на різальній кромці інструменту. Розроблено метод фінішної обробки робочих поверхонь інструментів із ПКНБ групи VL шляхом вібро-магнітно-абразивного впливу (ВіМАО), який дозволяє отримувати округлення різальної кромки із радіусом до 50 мкм в залежності від часу обробки. Для випадку  $r = 30$  мкм, який був отриманий при фінішній обробці методом ВіМАО, проведено розрахунок ймовірності руйнування інструменту, яка складає 30%, що у два рази нижча ніж з інструментами після стандартної фінішної обробки (рис. 3, б). Зменшення ймовірності руйнування пов'язано із змінами умов контактування інструменту із оброблюваним матеріалом, що приводить до збільшення зони контакту та перерозподілу напружень, внаслідок чого треті головні напруження зменшуються. Подальше збільшення радіусу округлення різальної кромки

недоцільне, оскільки при високих швидкостях різання ( $> 220$  м/хв.) це призводить до суттєвого збільшення температури різання та інтенсифікації хімічних реакцій взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом.

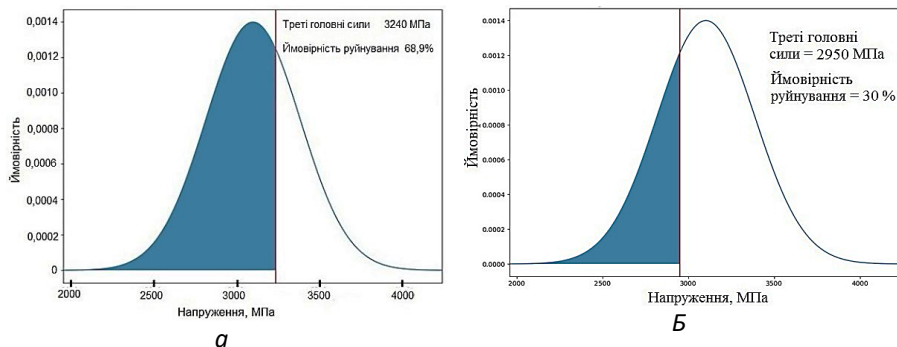


Рис. 3. Ймовірність руйнування інструментів із ПКНБ групи VL при точінні сталі ШХ15 (53 HRC) з ударом (а) та ймовірність руйнування інструментів із ПКНБ групи VL після додаткової фінішної обробки методом ВіМАО ( $v = 215$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)

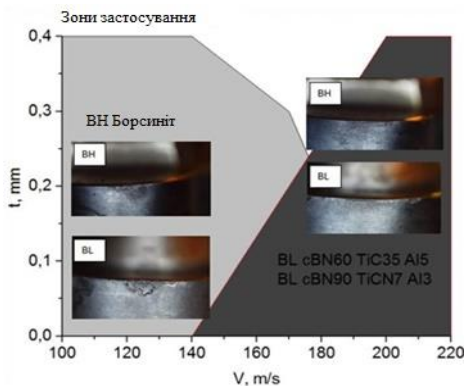


Рис. 4. Діаграма умов ефективного використання ПКНБ груп VN і VL при обробці загартованої сталі ХВГ із динамічними навантаженнями

Стійкісні дослідження дозволили визначити умови ефективного застосування інструментів із ПКНБ груп VL та VN при обробці із динамічними навантаженнями (рис. 4). Наявність зміцнюючої радіусної фаски для інструментів із ПКНБ групи VL дозволяє ефективно проводити обробку із невеликими перетинами зрізу при швидкостях різання 160-220 м/хв.

УДК 621.7.452

**О.О. Лазарєва**, ст. викладач,

**Н.В. Сахнюк**, к.т.н., доцент,

*Національний університет «Запорізька політехніка»*

## ПРОГРОЗУВАННЯ ВИТРИВАЛОСТІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД В ДОСЛІДНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В умовах швидкопереналагоджуваного виробництва, яким є дослідне виробництво, необхідно за мінімальний термін отримати виріб, який відповідав би всім вимогам щодо точності виготовлення, продуктивності, довговічності, надійності. Одним із сучасних та ефективних методів отримання лопаток компресорів у дослідному виробництві служить технологія, що включає високошвидкісне фрезерування (ВШФ) та фінішну обробку [1]. Застосування цієї технології викликає необхідність дослідження впливу низки факторів, що визначають якісні характеристики лопаток, таких як межа витривалості, шорсткість, глибина та ступінь наклепу, залишкові напруги та деякі інші.

На основі рівнянь лінійної множинної регресії розглянемо визначення залежності межі витривалості  $\sigma_{-1}$  лопаток, виготовлених поєднанням ВШФ з подальшою оздоблювально-зміцнювальною обробкою, від параметрів якості їх поверхневого шару. Регресійно-кореляційний аналіз зводиться до встановлення рівняння регресії (моделі), тобто виду залежності між випадковими величинами, аргументами  $x$  та функцією  $y$ , оцінка тісноти зв'язку між ними, достовірності та адекватності результатів.

Критерієм близькості кореляційної залежності між  $x$  та  $y$  є коефіцієнт парної кореляції  $R^2$ .

Перевірку емпіричної залежності виконували на: відтворюваність за критерієм Кохрена; адекватність (для малої вибірки) за критерієм Фішера; значимість за критерієм Стьюдента.

Знаходження рівнянь лінійної множинної регресії, коефіцієнтів регресії, а також перевірка моделі на відтворюваність, адекватність та значимість проводилося з використанням програми STATISTICA.

Вихідні дані отримання залежності представлені в табл. 1, а парні коефіцієнти кореляції – у табл. 2.

Таблиця 1 – Вихідні дані для отримання моделі межі витривалості лопаток

$\sigma_{-1\text{вих.}}$ , МПа	$R_a$ , мкм	$h_s$ , мкм	$S$ , %	$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	$h_\sigma$ , мкм	$h_{\text{стаб.}}$ , мкм
540,5	0,224	18,8	26,6	307	2	45
540,5	0,295	18,8	26,6	307	2	50
540,5	0,248	29,5	26	392	2	65
540,5	0,318	29,5	26	392	2	70
571,5	0,299	39,7	39,6	292	18	88
571,5	0,396	39,7	39,6	292	22	90
504	0,309	27,5	23,7	470	10	78
504	0,392	27,5	23,7	470	20	80

Примітка.  $\sigma_{\text{вих.}}$  – межа витривалості лопаток, МПа;  $R_a$  – шорсткість поверхні, мкм;  $h_s$  – глибина наклепу, мкм;  $S$  – ступінь наклепу, %;  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальна стискаюча напруга, МПа;  $h_\sigma$  – глибина залягання максимальної напруги, мкм;  $h_{\text{стаб.}}$  – глибина стабілізації напруг, мкм.

**Таблиця 2 – Парні коефіцієнти кореляції**

Параметр	$\sigma_{\text{вих.}}$ , МПа	$R_a$ , мкм	$h_s$ , мкм	$S$ , %	$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	$h_\sigma$ , мкм	$h_{\text{стаб.}}$ , мкм
$\sigma_{\text{вих.}}$ , МПа	1,00	-0,06	0,54	0,88	-0,89	0,16	0,18
$R_a$ , мкм	-0,06	1,00	0,50	0,27	0,23	0,79	0,72
$h_s$ , мкм	0,54	0,50	1,00	0,78	-0,16	0,71	0,91
$S$ , %	0,88	0,27	0,78	1,00	-0,71	0,59	0,56
$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	-0,89	0,23	-0,16	-0,71	1,00	0,02	0,18
$h_\sigma$ , мкм	0,16	0,79	0,71	0,59	0,02	1,00	0,85
$h_{\text{стаб.}}$ , мкм	0,18	0,72	0,91	0,56	0,18	0,85	1,00

Попередні розрахунки показали не значущість параметрів  $h_s$ ,  $h_\sigma$ ,  $h_{\text{стаб.}}$ , отже, складаємо матрицю, виключаючи дані значення (табл. 3), за якою розраховуємо коефіцієнти регресії (табл. 4).

**Таблиця 3 – Матриця скоригованих вихідних даних та вихідних параметрів**

$\sigma_{\text{вих.}}$ , МПа	$R_a$ , мкм	$S$ , %	$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	$\sigma_{\text{вих.}}$ , МПа	$S_{\sigma_{\text{вих.}}}$ , МПа
540,5	0,224	26,6	307	546,587	6,087
540,5	0,295	26,6	307	543,003	2,503
540,5	0,248	26	392	531,537	8,962
540,5	0,318	26	392	528,004	12,496
571,5	0,299	39,6	292	574,717	3,217
571,5	0,396	39,6	292	569,821	1,679
504	0,309	23,7	470	511,761	7,761
504	0,392	23,7	470	507,571	3,571
<b>4313</b>	<b>2,481</b>	<b>231,8</b>	<b>2922</b>		

**Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії**

Параметр	Вільний коефіцієнт	$R_a$ , мкм	$S$ , %	$\sigma_{\text{max}}$ , МПа
Коефіцієнт регресії	542,118	-50,475	2,286	-0,147
Розсіювання коефіцієнта регресії	45,949	29,602	1,008	0,087

На основі прийнятих вихідних даних отримана емпірична залежність впливу параметрів якості поверхневого шару на межу витривалості  $\sigma_{\text{I}}$  лопаток, отриманих ВШФ з подальшим поліруванням та ультразвуковим зміцненням:

$$\sigma_{\text{I}} = 542 - 50,475 R_a + 2,286 S - 0,147 \sigma_{\text{max}}$$

Нормуємо матрицю та наведемо коефіцієнти регресії до загальної системи виміру, тобто. розділимо кожне значення на середнє за показником та отримаємо нову матрицю.



Таблиця 5 – Матриця нормованих вихідних даних

$\sigma_{\text{вих.}}, \text{МПа}$	$R_a, \text{мкм}$	$S, \%$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$
0,1253	0,0903	0,1148	0,1051
0,1253	0,1189	0,1148	0,1051
0,1253	0,0999	0,1122	0,1342
0,1253	0,1282	0,1122	0,1342
0,1325	0,1205	0,1708	0,0999
0,1325	0,1596	0,1708	0,0999
0,1169	0,1245	0,1023	0,1608
0,1169	0,1580	0,1023	0,1608

Розрахувавши матрицю, отримуємо емпіричну залежність, у якій коефіцієнти регресії показують значущість кожного з них:

$$\sigma_{-1} = 0,125 - 0,029R_a + 0,123S - 0,098\sigma_{\text{max.}}$$

З цієї залежності випливає, що найбільший вплив на межу витривалості лопаток, отриманих послідовним ВШФ і оздоблювально-зміцнювальною обробкою, надають параметри  $S$  і  $\sigma_{\text{max}}$ .

Перевірку емпіричної залежності проводили за даними експериментів, не включених до початкових розрахунків (табл. 6).

Для оцінки помилки, що допускається при описі істинної залежності  $\sigma_{-1}$  за допомогою знайденого рівняння регресії за відсутності повторних дослідів та дисперсії відтворюваності, складемо  $F$  співвідношення ( $F_p$ ) між дисперсією щодо  $\bar{y}$  ( $S_y^2$ ) та залишковою дисперсією  $S_{\text{зал.}}^2$ .

Таблиця 6 – Матриця даних для перевірки залежності

$\sigma_{\text{вих.}}, \text{МПа}$	$R_a, \text{мкм}$	$S, \%$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{вих.}}, \text{МПа}$	$S_{\text{зал.}}^2$	$S_y^2$
541	0,259	26,6	300	545,566	20,85082	44,10281
545	0,283	25	388	527,797	295,9298	123,8298
571	0,347	39,6	290	572,232	1,517602	1109,332
504	0,351	23,7	465	510,106	37,2775	830,5777
				<b>538,925</b>	<b>355,5757</b>	<b>2107,842</b>

З розрахунків отримано:  $F_p=5,928$ ;  $R^2=0,8313$ ;  $R=0,9118$ .

Знайдене лінійне рівняння регресії з більшою ймовірністю 0,95 адекватно визначає реальну залежність, тому що значення співвідношення  $F_p$  більше значення квантилю розподілу Фішера при  $\alpha=0,05$  та степенях свободи  $f_1=N-1$  і  $f_2=N-L$  ( $F_{\text{табл.}}=2,644$ ). Точність опису (коефіцієнт кореляції  $R^2$ ) реальної залежності знайденим лінійним рівнянням регресії становить 95%.

Похибка моделі становить до 5%.

Таким чином, отримані емпіричні залежності встановлюють зв'язок основних параметрів якості поверхневого шару з величиною витривалості межі лопаток. Дані залежності дозволяють цілеспрямовано формувати межу витривалості лопаток компресорів ГТД, прогнозуючи ресурс їхньої роботи [2].

## **Література:**

1. Сахнюк Н.В., Івченко Л.Й. Управління якістю поверхні лопаток ГТД технологічними методами // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2011. вип. № 28. С. 264-268.
2. Сахнюк Н.В. Технологічне забезпечення якості лопаток компресорів в дослідному виробництві: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.08. Харків, 2008. 21 с.

УДК 691.028

**С.О. Бахман**, аспірант,  
**П.П. Мельничук**, д.т.н., професор,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР**

Для забезпечення потреб економічного розвитку держави, особливо у військовий час, транспортна галузь має виконувати великий обсяг як вантажних, так і пасажирських перевезень. Особливу актуальність в Україні це набуло саме зараз, коли відсутні авіаційні перевезення та суттєво скоротилися перевезення морським та річковим транспортом. Визначальну роль у виконанні перевезень виконує залізниця. «Українська залізниця» (АТ«Укрзалізниця») — засноване у жовтні 2015 державне акціонерне товариство залізничного транспорту загального користування, національний перевізник вантажів та пасажирів, метою діяльності якого є задоволення потреб у безпечних та якісних залізничних перевезеннях у внутрішньому та міжнародному сполученнях, забезпечення ефективного функціонування та розвитку залізничного транспорту. Де-факто «Укрзалізниця» є державним підприємством-монополістом у сфері залізничних перевезень, забезпечує майже 82 % вантажних і 36 % пасажирських перевезень від загального обсягу, здійснюваного всіма видами транспорту в Україні [1]. За обсягами вантажних перевезень українська залізниця займає четверте місце на Євразійському континенті [2].

З початку активних воєнних дій на усій території України вітчизняна залізниця не лише взяла на себе роль основної евакуаційної структури, а й організувала цілу систему логістики для гуманітарних вантажів. Окрім цього, Укрзалізниця продовжує надавати послуги перевезення громадянських та військових вантажів, кількість яких суттєво збільшилася після початку повномасштабної війни.

Одним з головних питань, яке постає перед Укрзалізницею, залізничними підрозділами підприємств промисловості та метрополітену є підвищення довговічності та зносостійкості колісних пар. Однак, в умовах сьогодення собівартість та трудомісткість ремонту колісних пар вагонів, локомотивів та моторвагонного рухомого складу виросла в декілька разів, враховуючи експлуатацію рухомого складу зверх нормативного строку експлуатації. Для забезпечення безпеки руху поїздів Укрзалізниця планує та виконує для такого виду рухомого складу КРП (капітальний ремонт з подовженням терміну експлуатації). Основна частина рухомого складу експлуатується тривалий час та потребує періодичного ремонту, зокрема колісних пар, котрі є одними з головних складових елементів залізничних вагонів. [3].

Головними видами несправностей колісних пар є: прокат ободів колес, зношування ободів по товщині, вертикальний підріз гребенів, повзуни, раковини та вищербини на поверхні кочення, зношення і пошкодження шийок осі, тріщини в осях, протертості та згин осі, послаблення та зсув на осі, тріщини в колесах [4, 5].

На сьогодні з існуючих методів відновлення профілю ободу колісної пари найбільш поширеним є лезова обробка [6, 7], яка здійснюється точінням на колесо-токарних верстатах або фрезеруванням збірними фасонними фрезами на колесо-фрезерних верстатах.

Ці технологічні процеси можуть виконуватися як безпосередньо на локомотиві при проведенні його технічного обслуговування ТО-4 без викатки (демонтажу) колісної пари з рухомого складу, так із викаткою колісної пари та її відновлення на верстаті при інших видах ремонту та технічного обслуговування.

Для відновлення профілю можливе використання різних методів наплавки елементів профілю колісної пари з послідуною їх лезовою обробкою.

Останнім часом на залізниці є тенденція використання зміцнених рейок з підвищеною твердістю, що потребує зміцнення контактуючих з ними поверхонь коліс, а відповідно розробки та використання нових технологій відновлення профілю поверхні кочення згідно з діючими нормативними документами.

Всі ці методи мають різні суттєві переваги та недоліки, які потребують вивчення та вдосконалення.

Тому дослідження ефективності процесів відновлення залізничних колісних пар є пріоритетною метою автора роботи в рамках PhD-програми.

### **Література:**

1. <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zalznici.html>
2. [https://uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/](https://uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/)
3. Тіхенко В.М. Підвищення ефективності обробки на колесо-токарних верстатах / В.М. Тіхенко, С.В. Пчелинський // Праці Одеського політехнічного

університету. – Одеса, 2012. – Вип. 1 (38). – С. 84–87. – (Серія «Машинобудування. Технологія металів. Матеріалознавство»).

4. Андрейко І. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс/ І. Андрейко, В. кулик. В. Прокопець//машинознавство.-2011.-№ 1-2.-С.32-36.

5. Гузенко В. С. Дослідження динамічної стійкості процесу механообробки колісних пар / В.С. Гузенко, С.Л. Миранцов, И.И. Полупан, А.А. Шульга // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2009. – Вип. 25. – С. 22–27.

6. <http://www.kzts.com/products.html>

7. <http://railway.lvsv.ua/railvay/depts/dorozhni-mekhanichni-maisterni-svano-frankivsk/vyrobnyctvo-verstativ/>.

УДК 621.95:678.8

**О.В. Матошин**, магістрант,  
**С.П. Вислоух**, к.т.н., доцент,  
*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*

## **АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВУГЛЕПЛАСТИКУ**

Механічне оброблення композитних матеріалів, включаючи вуглепластики, є актуальною темою для проведення досліджень. Операції свердління в цих матеріалах використовуються для отримання заклепкових і болтових з'єднань при складанні виробів. Для отримання з'єднань деталей з високою міцністю у вуглепластику необхідно просвердлити високоточні отвори без пошкоджень. Однак даний процес непростий в порівнянні з процесом свердління традиційних конструкційних матеріалів. Внаслідок притаманній багатофазності вуглепластику цей процес є більш складний. Тут свердло має проходити по черзі через матрицю і волокно (наповнювач), які мають різні властивості. Це ускладнює протікання даного процесу. Через високу швидкість деформації неоднорідного матеріалу в процесі свердління вуглепластику розподіл навантаження між матрицею та волокном є нерівномірним, що призводить до серії руйнувань у композитному матеріалі. Тому визначення оптимальних параметрів різання є одним з найважливіших завдань у дослідженні оброблюваності вуглепластиків.

У контексті розвитку масового та серійного виробництва параметрична оптимізація при свердлінні деталей із вуглепластику є надзвичайно важливою для досягнення балансу між вартістю, якістю та точністю. Дана технологічна операція характеризується наступними вхідними даними: кількість обертів

свердла (або швидкість різання), подача, геометрія свердла (кут при вершині свердла або кут нахилу гвинтової канавки) та діаметр свердла. В якості параметрів процесу різання використовуються осьова сила, крутний момент та вихідні параметри – розшарування на вході в матеріал та виході з нього, а також ексцентриситет. При цьому важливо отримати оптимальні режими оброблення, які забезпечать максимальну продуктивність, тобто параметр швидкості знімання матеріалу потрібно максимізувати. В свою чергу, показники якості (розшарування та шорсткість поверхні) та параметри, що на них впливають, (осьова сила та крутний момент) потрібно мінімізувати. Із попередніх досліджень [1] встановлено, що особливу увагу потрібно приділяти саме розшаруванню, оскільки це є основним дефектом при свердлінні вуглепластику. Розшарування зазвичай визнається основною причиною зниження жорсткості та міцності деталей з композиту.

Вимірювання розшарування є складним процесом, і його можна виконати кількома методами. Зазвичай для вимірювання розшарування використовують цифрову обробку зображень, С-сканування, ультразвук, рентгенівське опромінення і лазерну візуалізацію. Через це даний параметр напряму вимірювати в процесі оброблення досить неефективно, тому доцільно отримати математичну залежність коефіцієнта розшарування від осьової сили. Для мінімізації розшарування, спричиненого свердлінням, використовували різні методи. Дослідники [1-3] намагалися оптимізувати робочі параметри, геометрію та матеріал інструменту, теоретичне моделювання сил свердління та використали деякі нетрадиційні методи просвердлювання отвору без пошкодження у матеріалі.

Для підвищення ефективності процесу свердління отворів в деталях з вуглепластику пропонується використовувати систему автоматизованого керування (АСК). При цьому попередні дослідники [1] шляхом використання дисперсійного аналізу (ANOVA) визначали відсотковий внесок параметрів свердління та встановили, що подача є найбільш впливовим фактором при свердлінні деталей із вуглепластику, тому даним параметром доцільно керувати в АСК.

Метою використання АСК є отримання отвору з великою продуктивністю з забезпеченням необхідних параметрів якості, в тому числі й розшарування. Відповідними етапами процесу контролю є: запуск процесу із наперед визначеними (рекомендованими) режимами оброблення; підхід, де свердло виконує переміщення до заготовки; контакт, коли наконечник свердла контактує з матеріалом заготовки; нормальне свердління, тобто свердління без розшарування (або в межах допустимого); ініціація розшарування, в разі перевищення критичної осьової сили починається розшарування; коригування режимів оброблення з використанням зворотного зв'язку шляхом зменшення значення подачі; вихід свердла, коли наконечник свердла виходить наскрізь із заготовки; завершення процесу свердління, коли отвір вже отримано; відведення свердла, тобто свердло необхідно відвести із заготовки та перемістити назад в нульову точку.

Під час свердління вуглепластику встановлено, що зі збільшенням кількості обертів шпинделя підвищується температура в зоні оброблення, що призводить до розм'якшення матеріалу матриці, тим самим зменшуючи ймовірність розшарування [1]. Збільшення кількості обертів свердла також забезпечує підвищення продуктивності оброблення. В свою чергу, розшарування починається, коли осьова сила перевищує критичне порогове значення. Слід зазначити, що осьова сила є ключовим елементом для опису оброблюваності композитних матеріалів, оскільки вона безпосередньо впливає на якість просвердлених отворів. Крім осьової сили, крутний момент також впливає на розшарування отворів. Оскільки осьова сила є основним фактором, що впливає на розшарування, кілька дослідників [3] намагалися зменшити дану силу під час свердління або якимись засобами підвищити критичну осьову силу. Наприклад, критична осьова сила може бути збільшена шляхом використання опорної плити під заготовкою. Встановлено, що використання спеціальних сверدل порівняно зі звичайними спіральними свердлами підвищує загальну ефективність процесу та забезпечує кращий контроль розшарування. При цьому збільшення діаметра свердла збільшує площу контакту просвердленого отвору, що має тенденцію до збільшення осьової сили та, як наслідок, збільшення розшарування. З іншого боку, збільшення подачі також призводить до збільшення розшарування через збільшення осьової сили. Отже, у найгіршому випадку розшарування відбувається при найвищій подачі та низьких обертах шпинделя.

Таким чином, для мінімізації пошкодження отвору, пропонується контролювати параметри процесу та виконувати їх корегування в режимі реального часу. Тоді АСК на основі використання математичної моделі коефіцієнта розшарування може підтримувати значення осьової сили нижче критичного під час свердління вуглепластику. Вимірювання осьової сили рекомендується виконувати за допомогою п'єзоелектричного динамометра з подальшою обробкою його результатів.

Для створення математичної моделі пропонується провести комп'ютерний експеримент з використанням навченої штучної нейронної мережі (ШНМ) прямого розповсюдження. Коефіцієнт розшарування є функцією подачі, кількості обертів шпинделя, а також певного параметра свердла. Для навчання ШНМ доцільно використовувати алгоритм зворотного поширення помилки. При цьому структура нейронної мережі представлена на рис. 1. Вхідний шар містить 3 нейрони, на які поступають дані з кількістю обертів, подачею та діаметром свердла. Вихідний шар містить 1 нейрон, який прогнозує коефіцієнт розшарування отвору. Також структура даної нейронної мережі включає один прихований шар із певною кількістю нейронів, яка визначається методом проб і помилок.

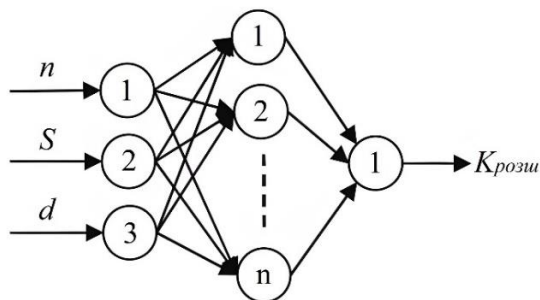


Рис. 1. Архітектура ШНМ для прогнозування коефіцієнта розширення отвору

Загалом навчання нейронної мережі полягає в знаходженні оптимальних значень синаптичних ваг, що дозволить спрогнозувати вихідний параметр із бажаною точністю.

Таким чином, на основі спрогнозованих даних створюється математична модель процесу свердління отворів в будь-якому композиційному матеріалі. Отримана математична модель є основою для розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів оброблення, які будуть початковими даними для роботи АСК.

Отже, механічна обробка без дефектів, що забезпечує високу продуктивність, справді є складним завданням при свердлінні вуглепластику. Це вимагає відповідних знань щодо поведінки процесу обробки, а також оптимізації параметрів обробки. Описана автоматизована система керування дозволить максимізувати продуктивність, забезпечуючи при цьому відсутність дефектів у деталі.

### Література:

1. Bhushi U., Suthar J., Teli S. N. Performance analysis of metaheuristics optimization techniques for drilling process on CFRP composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 28. P. 1106–1114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.091>.
2. Матошин О.В., Вислоух С.П. Моделювання шорсткості поверхонь, отриманих свердлінням композиційних матеріалів // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023); Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 19 квітня 2023 р. – с. 77 – 78.
3. Phapale K., Ahire A., Singh R. Experimental characterization and finite element modeling of critical thrust force in CFRP drilling. *Machining Science and Technology*. 2017. Vol. 22, no. 2. P. 249–270. URL: <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1337134>.

УДК 621.9

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

## **ОСОБЛИВОСТІ І ВЛАСТИВОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ЧАВУНІВ**

Чавун – це залізний сплав, який історично використовується в різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Зокрема, сірий та високоміцний чавун мають свої характеристики, які впливають на їхнє застосування у металообробці [1].

Металургія та металообробка завжди були важливими секторами промисловості, які відіграли важливу роль у розвитку суспільства. Починаючи з часів епохи бронзи та до наших днів, обробка металів є ключовим компонентом виробництва продуктів, які ми використовуємо у повсякденному житті. Варіативність властивостей різних видів металів вимагає глибокого розуміння для їх успішної обробки. Давайте розглянемо особливості сірого та високоміцного чавунів, їх роль у процесі металообробки, а також сучасні методи та інструменти, які дозволяють оптимізувати процес обробки цих матеріалів.[2]

Обробка металів є однією з ключових операцій у сфері металообробки, що дозволяє отримувати вироби з необхідною формою та розмірами. У виготовленні багатьох деталей та конструкцій часто застосовуються сірий та високоміцний чавун. Властивості цих матеріалів впливають на вибір методів та інструментів для їх обробки.[3]

Чавун, завдяки своїй унікальній структурі з графіту, потребує особливого підходу під час обробки. Цей матеріал може бути таким твердим, як сталь, або навіть м'якшим в залежності від його типу, але його графітна складова завжди робить обробку викликом.

Основні види чавуну, такі як зносостійкий, високоміцний та вермикулярний, мають різні характеристики, які впливають на вибір інструментів під час обробки. Наприклад, вермикулярний чавун, який має графіт у формі вермикулітів, потребує використання інструментів з підвищеною твердістю та здатністю амортизувати вібрації [4].

Особливості інструментів для обробки чавуну включають наступне:

- **вібростійкість:** обробка чавуну часто супроводжується вібрацією через його графітну структуру. Тому інструменти повинні мати демпфуючі властивості для зменшення інтенсивності вібрацій;
- **твердість:** для ефективної обробки чавуну інструменти повинні бути дуже твердими, щоб уникнути швидкого зношування;
- **термостійкість:** під час різання чавуну відбувається вища тепловиділення, тому інструменти повинні витримувати високі температури [5].

Особливості обробки чавуну включають також:



- підвищені температури: через структуру чавуну, під час обробки можуть виникати підвищені температури;
- вища швидкість різання: чавун, особливо вермикулярний, може вимагати вищих швидкостей різання для оптимального відділення матеріалу припуску;
- нерівномірна якість поверхні: під час обробки частки чавуну можуть випадати, залишаючи нерівності на обробленій поверхні;
- вібрації: значні вібрації можуть призвести до проблем зі стійкістю інструментів, точністю та якістю обробки [6].

Також важливо враховувати вибір оптимальних параметрів різання для різних видів чавуну. Наприклад, при обробці високоміцних чавунів рекомендується використовувати нижчі швидкості та глибину різання порівняно з обробкою сірого чавуну, але залишаючи великі подачі.

Ще одним важливим аспектом є техніка охолодження. Оскільки високоміцний чавун відрізняється великою твердістю, що викликає інтенсивне зношування інструментів, рекомендується використовувати охолодження під час обробки цих матеріалів. Охолодження допомагає знизити температуру в зоні різання, зменшує ризик перегріву, зносу та руйнування інструментів, а також поліпшує якість обробленої поверхні [7].

Крім того, вибір інструментів може залежати від конкретної задачі, будь то груба лезова обробка, чистова лезова обробка чи фінішне шліфування.

Для грубої обробки іноді обирають інструменти з більшою жорсткістю, але меншою стійкістю до зношування, тоді як для чистової обробки потрібний інструмент з високою стійкістю до зношування.

Правильний вибір інструменту для обробки чавуну, з урахуванням його особливостей та властивостей, є ключовим фактором для забезпечення високої продуктивності виробництва і якості виробів. Новітні технології та матеріали для різальних інструментів постійно розвиваються, щоб відповідати високим вимогам сучасного виробництва [8].

Основна відмінність сірого чавуну від інших видів чавуну полягає у наявності у ньому пластинчастого графіту. Ці пластинки графіту розділяють металеву основу чавуну, створюючи характерну "шарувату" структуру матеріалу. Це призводить до підвищеної ломкості при обробці сірого чавуну, що полегшує процес різання та забезпечує кращу оброблюваність [9].

На відміну від сірого чавуну, високоміцний чавун містить значно більше кремнію, а також різні домішки та карбіді. Ці компоненти надають високоміцному чавуну велику твердість, що робить процес обробки більш вимогливим. Збільшена твердість матеріалу ускладнює процес різання та вимагає використання спеціалізованого інструменту та оптимальних параметрів обробки [10].

Внаслідок цього розхід інструменту при обробці високоміцного чавуну значно вищий, ніж при роботі із сірим чавуном. Тому для ефективної обробки високоміцних чавунів потрібно використовувати спеціальні інструменти та методи [5].

Для зменшення зносу ріжучих інструментів шляхом зниження інтенсивності адгезії до оброблюваного матеріалу застосовують різні види покриттів. Серед них можна виділити такі, як TiN, TiAlN, і TiSiN, які зменшують адгезійну взаємодію. Для зниження інтенсивності окислювальних процесів використовується покриття на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Наразі найпоширенішим вибором для інструментів, виготовлених з твердих сплавів з кобальтовим сполученням, є покриття, засновані на нітриді титану (TiN), які наносяться як хімічним, так і фізичним методом осадження. Властивості такого покриття сильно залежать від вмісту азоту в нітриді та швидкості його нанесення. За високої швидкості нанесення виникають дефекти в структурі, а за низької швидкості утворюється лускате покриття, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках інструменту. Крім того, висока мікротвердість TiN (20–40 ГПа) пов'язана з внутрішніми напруженнями, що досягають 10–12 ГПа. Ще одним істотним недоліком, що обмежує використання цього покриття в інструментальному виробництві, є його низька стійкість до окислення. Під час нагрівання вище 550 °C на поверхні покриття TiN утворюється крихкий шар титанового оксиду з низькою адгезією, що істотно знижує зносостійкість покриття.

Завдяки сучасним матеріалам та технологіям, таким як багатшарові покриття на різальних інструментах, можливо досягти високої продуктивності та довгого терміну служби інструменту під час обробки таких складних матеріалів, як високоміцний чавун.

### **Література:**

1. Araki T. Influence of Metallurgy on Machinability / T. Araki, S. Yamamoto // Proceed. of the Inter. Symposium on Influence of Metall. on Machinability, 1975. – Vol. 7. – P. 159–173.
2. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron / S. Dawson, I. Hollinger and other. – SinterCast, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: <https://sintercast.com/media/1571/sintercast-the-effect-of-metallurgical-variables-on-the-machinability-of-compacted-graphite-iron-1.pdf>.
3. ISO 16112-2017 Compacted (vermicular) graphite cast irons Classification.
4. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / B. Tasdelen, M. Escursell, G. Grenmyr, L. Nyborg // Swedish Production Symposium. – 2007.
5. Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools / Jiahui Niu, Chuanzhen Huang, Rui Su and other.
6. Виговський, Г.М. Визначення режимів обробки торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами, при чорновій обробці сірого чавуну / Г.М. Виговський, В.М. Бушля // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2012. – Вип. 13. – С. 28–38.
7. Milling Forces of Compacted Graphite Iron (CGI) and Gray Iron (GI) / Y. Guo, C. Y. Wang, H. Yuan and other.

8. Радкевич, С.І. Оброблюваність чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами /С.І. Радкевич, Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук// Технічна інженерія. – 2021. – № 1 (87). – С. 38–48.

9. Чавун з вермикулярним графітом : навчально-методичний комплекс для студентів денної і заочної форм навчання / В.М. Кропівний, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Г.М. Засінець ; заг. ред. В.М. Кропівного. – Кропивницький: Видавець В.Ф. Лисенко, 2019. – 222 с.

10. Кропівна А.В. Аналіз та гармонізація національних до міжнародних стандартів якісних показників чавунів з вермикулярним графітом /А.В. Кропівна, О.В. Кузик // Центральноукраїнський науковий вісник. Сер. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2020. – Вип. 3 (34). – С. 88–95.

УДК 621.923

**І.А. Сергієнко**, магістр,  
**І.В. Слободянюк**, к.т.н., доцент,  
*Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"*

## **ХАРАКТЕР ВИТІСНЕННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ПОРОШКУ ІЗ РОБОЧОЮ ЗОНИ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ СТРИЖНЕВИМ ЕЛЕМЕНТОМ**

Для забезпечення високої продуктивності та якості вихідних поверхонь під час магнітно-абразивної оброблення (МАО) потрібно мати стабільні характеристики магнітно-абразивного інструменту (МАІ). В свою чергу вона порушуються через проходження через нього деталі, що призводить до розрідження робочого середовища [1]. Для покращення стабільності характеристик МАІ та запобігання розкидання використовується відновлювальний стрижневий елемент (ВСЕ) [2]. У свою чергу, він допомагає покращити характеристики, але на ньому спостерігається витіснення порошку рис. 1, що негативно впливає на процес подальшої обробки.



Рис. 1: Характер витіснення частинок МАІ із робочої зони під час обробки

Було визначено, що основними характеристиками, які впливають на цей процес є швидкість обертання, магнітна індукція та кут нахилу ВСЕ. З огляду на це було проведено дослідження, стосовно впливу цих параметрів на висоту підйому та проаналізовано їх вплив. Тому метою роботи було дослідження впливу швидкості переміщення, магнітної індукції та куту нахилу ВСЕ на висоту витіснення порошку і визначення раціональних параметрів для її зменшення.

Експериментальні дослідження проводилися із використанням порошку Феромап 315/200, із коефіцієнтом заповнення робочої зони  $K_z=0,8$  [2] і застосуванням мастильно-охолоджувального технологічного середовища – Асфол. Варіювали величину магнітної індукції (В) в межах 0,15-0,245Тл, швидкість обертання (V)-100-300 об/хв та кут нахилу ( $\alpha$ ) -  $40^\circ$  –  $60^\circ$ . Були побудовані поверхні відгуку висоти витіснення робочого середовища із робочої зони рис. 2. Показано, що висота витіснення збільшується при збільшенні куту нахилу ВСЕ, та зменшенні частоти обертання та магнітної індукції, що, пояснюється впливом ВСЕ та магнітного поля та робоче середовище.

А саме, зменшення швидкості призводить до зменшення частки впливу динамічних сил та до формування більш стабільних структурних елементів - веретеноподібних утворень, які можуть пересуватися вгору вздовж ВСЕ. В той час, як збільшення значень магнітної індукції призводить до зменшення відношення динамічних сил відносно магнітних [1], що призводить до збільшення ефекту притягання елементів МАІ до полюсів магніту, що в свою чергу зменшує його кількість на поверхні ВСЕ та зменшує висоту. Залежність висоти витіснення від куту нахилу важко описати лінійно чи степеневу, через складний зв'язок її природи та зон скупчення робочого середовища. В спрощеному вигляді зі збільшенням куту нахилу збільшується величина вертикальної сили, що призводить до збільшення висоти підйому. Такий підхід є доцільним тільки при великих значеннях куту, більше  $50^\circ$ , оскільки при менших значеннях куту, збільшується взаємодія, із веретеноподібними утвореннями, що призводить до збільшення висоти. Таким чином раціональне

значення куту знаходяться в межах  $45^\circ - 50^\circ$ , в той час, як значення швидкості та магнітної індукції мають вибиратися максимальні, відповідно до типу та матеріалу обробленої деталі.

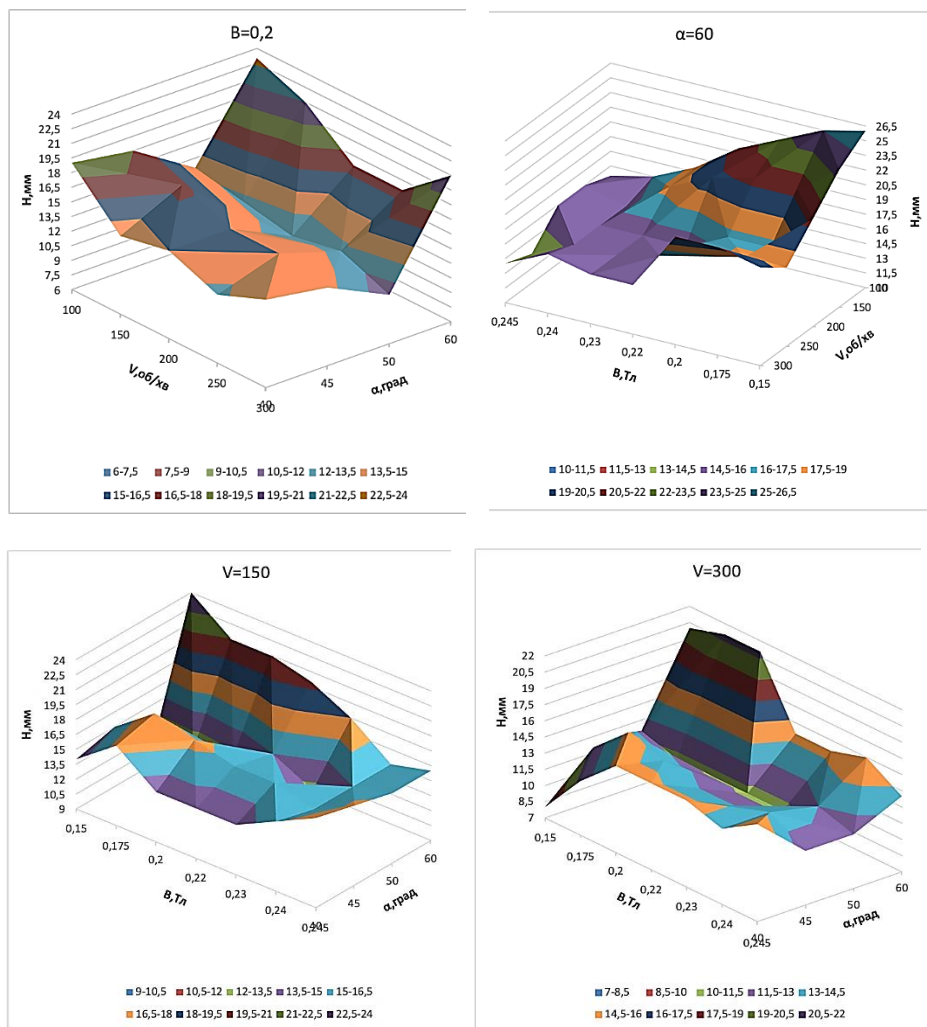


Рис. 2: Поверхні відгуку залежності висоти витіснення від параметрів обробки

**Висновок:** Показано, що характер витіснення робочого середовища за межі робочої зазору має зворотну залежність із швидкістю обертання та магнітною

індукцією, та позитивну залежність в межах куту нахилу  $50^{\circ}$  –  $60^{\circ}$ . Визначено, що кут нахилу має бути в межах  $45^{\circ}$  –  $50^{\circ}$ , а значення швидкості та індукції мають бути максимальні відповідно деталі.

### **Література:**

1. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка деталей складної форми / В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій. – Житомир: ПП "Рута", 2017. – 272 с. ISBN 978-617-581-336-2
2. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зонах кільцевого типу: дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна – Київ, 2015. – 164 с.

УДК 669.054.8

**О.В. Чернишов**, ст. викладач<sup>1</sup>,

**О.О. Чернишов**, інженер<sup>1</sup>,

**О.Ю. Чумаченко**, здобувач вищої освіти<sup>1</sup>,

**В.А. Яновський**, доцент<sup>2</sup>,

**А.М. Гайченя**, здобувач вищої освіти<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> *Дніпровський державний технічний університет (м. Кам'янське)*

<sup>2</sup> *Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МИТТЯ МЕТАЛЕВОЇ СТРУЖКИ**

Як показав аналіз, існує безліч способів миття металевих поверхонь. Але для створення машини для миття стружки доцільно, на наш погляд, використовувати комбінацію занурювального, струминного та ультразвукового методів. З метою вивчення процесу миття з використанням перерахованих методів було проведено експериментальні дослідження. Для дослідження була обрана миюча рідина, в яку входили чотири компоненти: їдкий натрій, кальцинована сода, рідке скло, тринатрійфосфат. Методика вибору миючого розчину включала оцінку таких параметрів як тривалість очищення металевих поверхонь від масляних та водних МОР, здатність переробки та регенерації, корозійний вплив на об'єкт очищення, стійкість розчину, вартість та здатність не утворювати великої кількості піни.

Експериментальні дослідження миття стружки проводилися в такий спосіб: змінювалася концентрація однієї з компонентів за постійної концентрації інших. У розчин об'ємом 50 л при температурі  $60^{\circ}\text{C}$  занурювалася порція

стружки масою 1 кг, забрудненою оливою «Індустріальне-20» (а також проводилися експерименти при забрудненні водними МОР ЕТ-2), інтенсивно перемішувалась, щохвилини витягувалась з розчину, висушувалась, зважувалася на електронних терезах. Експериментальні дані показали, що зі збільшенням концентрації розчину ступінь очищення зростає, а при досягненні певної концентрації її подальше збільшення істотного впливу на ступінь очищення не надає. Вплив концентрації кальцінованої соди за постійної кількості інших інгредієнтів на ступінь очищення представлено на рис. 1. Під ступенем очищення мається на увазі відношення у відсотках видаленої з поверхні стружки маси забруднювача до його початкової маси.

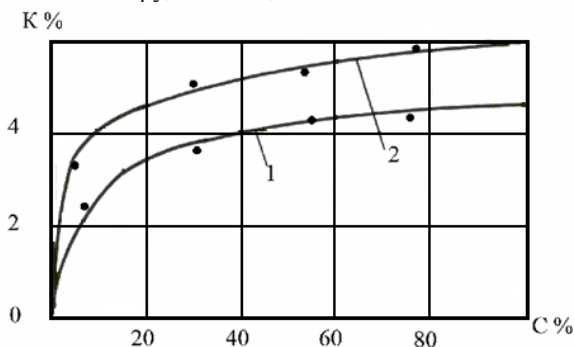


Рис. 1 Вплив концентрації кальцінованої соди на ступінь очищення стружки при  $t = 60^\circ\text{C}$  (1 – МОР - ЭТ2; 2 – масло «Індустріальне 20»)

Таким чином, в результаті досліджень було вивчено вплив концентрації розчину на процес очищення стружки та обраний миючий розчин [1].

Процес миття струменями не досліджувався, оскільки він добре вивчений іншими авторами.

В даний час існує безліч пристроїв для ультразвукового очищення металевих поверхонь. Але, на жаль, ці пристрої дорогі, складні у виготовленні та експлуатації. Для спрощення конструкції ультразвукової установки для миття стружки були проведені випробування гідродинамічних ультразвукових вібраторів для використання в процесі очищення металевих поверхонь.

На рис. 2 представлена залежність ступеня ультразвукового очищення від температури миючого розчину при використанні гідродинамічного вібратора з товщиною щілини сопла  $2 \cdot 10^{-3}$  м і товщиною пластини, що коливається  $2 \cdot 10^{-3}$  м і  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м, виготовленої з інструментальної сталі У7. Тиск живлення системи 90 Па.

З графіка видно, що зі збільшенням температури розчину та збільшенням товщини пластини ступінь очищення зростає [1].

З метою вивчення впливу температури та концентрації миючого розчину, а також часу миття та частоти ультразвукових коливань на ступінь очищення стружки з вуглецевої сталі в машинах, які використовують комбінований метод очищення, був використаний метод планування експерименту.

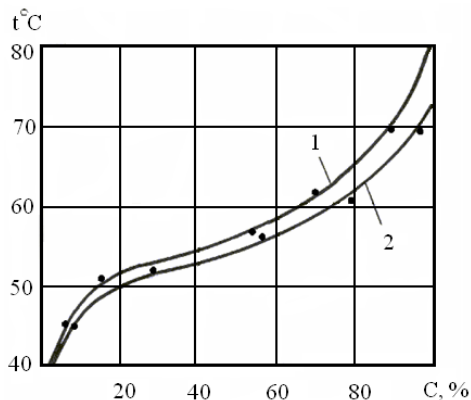


Рис. 2 Залежність ступеню очистки стружки від температури розчину при інтенсифікації процесу ультразвуковими вібраторами  
Товщина пластини вібратора: 1 –  $h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 –  $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; тиск живлення 90 МПа

Планування наукового експерименту не дозволяє отримати математичну модель досліджуваного процесу, лише дозволяє ефективно оцінити коефіцієнти математичної моделі, обраної виходячи з інформації про процес. Вибрана математична модель повинна відображати зв'язок між параметрами процесу, включеними до розгляду, і в загальному вигляді є функцією багатьох змінних.

$$Y = \varphi(X_1; X_2; \dots X_n) \quad (1)$$

Для побудови математичної моделі прийнято такі позначення:  $X_1$  – температура мийного розчину;  $X_2$  – концентрація мийного розчину;  $X_3$  – час миття;  $X_4$  – частота ультразвукових коливань;  $Y$  – ступінь очищення.

Стандартна модель включає лінійну і нелінійну комбінацію факторів. Оцінивши результати експериментальних та розрахункових даних за моделлю нами встановлено, що достатньо використовувати лише лінійну комбінацію факторів. Тому при розробці моделей виконано процедуру статистичної обробки даних щодо лінійної моделі з подальшою її перевіркою на адекватність фізичному процесу [91]. Передбачається, що ця модель буде використана у подальшому моделюванні фізичних процесів у пропонованій машині. Тому спрощення математичних залежностей дозволить створити надійніші методики розрахунку при проектуванні мийних машин.

Для проведення експерименту та побудови моделі залежності  $Y$  від  $X_i$  ( $i = 1; 2; 3; 4$ ) застосовувалися методи ортогонального центрального композиційного планування.

В нашому випадку ядро плану складала матриця  $2^4$ , а з урахуванням «зоряних» точок та центральної точки кількість дослідів складала 25. Рівні варіювання факторів в експерименті наведені у таблиці.



Таблиця Рівні варіювання факторів

Значення	«Зоряні» точки $\check{x}_3 = -1,414$	Нижній рівень $\check{x}_3 = -1$	Основной рівень $\check{x}_3 = 0$	Верхній рівень $\check{x}_3 = +1$	«Зоряні» точки $\check{x}_3 = +1,414$
X <sub>1</sub>	33,8	40	55	70	76,2
X <sub>2</sub>	1,2	2	4	6	6,8
X <sub>3</sub>	1,6	2	3	4	4,4
X <sub>4</sub>	0,8	1	1,5	2	2,2

Обробивши результати експериментів на ПК отримали рівняння, що описує миття стружки при оптимальних параметрах.

$$Y = -71,22 + 0,64 X_1 + 18,7 X_2 + 8,544 X_4. \quad (2)$$

З аналізу рівняння (2) видно, що параметр X<sub>3</sub>, що означає час миття, відсутня внаслідок своєї незначності.

### Висновки

1. Встановлено, що час миття стружки є незначним чинником. Це можна пояснити тим, що за рахунок інтенсифікації процесу миття ультразвуковими коливаннями до мінімуму скорочується час миття і подальше знаходження стружки в машині значного впливу не має.

2. Отримані результати миття стружки вуглецевих сталей можуть бути з невеликими уточненнями рекомендовані для миття стружки різних марок сталі, у тому числі і кольорових металів.

### Література:

1. Чернишов О.В. Підвищення ефективності процесу очищення металевої стружки від мастильно-охолоджуючих рідин за допомогою миючих розчинів /Чернишов О.В., Музичка Д.Г., Трикіло А.І., Яновський В.А. – Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. Випуск 5/2018 (112). – С.103 – 109.

УДК 621.923

**І.В. Бельмас**, д.т.н., професор, завідувач кафедри

**О.І. Білоус**, к.т.н., доцент, доцент

**Г.І. Танцура**, к.т.н., доцент, доцент

**О.І. Шабля**, пошукач вищої освіти другого рівня  
*Дніпровський державний технічний університет*

## УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ОЛІВЦЯ ПРАВЛЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

Шліфування – процес різання металів за допомогою абразивного інструменту, різальним елементом якого є зерна. Зерна мають високу твердість,

теплостійкість і гостри країки. Вони з'єднані спеціальними сполучними речовинами (зв'язкою) в шліфувальні круги, бруски і стрічки для шліфування. Абразивні зерна застосовують також у вигляді паст і порошків.

В процесі шліфуванні характер стружкоутворіння близький до різання, зубами фрези. В обох технологічних процесах мають місце пружне і пластичне деформування, тепловиділення, зміцнення, знос та інші процеси. Зерна інструменту абразивної обробки по різному приймають участь в знятті шару матеріалу. Разом зі стружкою при шліфуванні утворюється ще і металевий пил. За високих температур він спікається. Тепловиділення відбувається в наслідок випадкової геометрії різальних поверхонь зерен, значної швидкості різання. Збільшення зносу зерен супроводжується зростанням тепловиділення підвищується, зменшенням коефіцієнту корисної дії, може викликати деформацію деталі, припикання, структурні зміни і тріщини на обробленій поверхні. Робоча поверхня шліфувального інструменту втрачає свою початкову форму та різальну здатність. Її відновлюють – виправляють.

Для правлення кругів використовують різноманітні інструменти, зокрема алмазні олівці. Сили взаємодії абразивного інструменту та олівця впливають на рівень напружень в абразивному зерні та в матеріалі яким він приєднаний до його оправки. Циклічно змінні напруження впливають на витривалість абразивного зерна та матеріалу його приєднання до інструменту. Встановлення зв'язку напружено-деформованого стану інструменту включно алмаза й матеріалу що його приєднує до оправки, його силової взаємодії з абразивним кругом актуальна науково-технічна задача.

Абразивне зерно та матеріал його приєднання до оправки пружні тіла. Закономірності їх деформування в лінійній постановці підкоряються законамірностям визначеним методами класичної теорії пружності. Вони з'єднані поміж собою та є двошаровою композитною конструкцією, приймемо, призматичної форми. Для такої фізичної моделі склали математичну модель. В ній, в загальній формі до робочої поверхні зерна приклали розподілене нормальне навантаження. Його завдали у формі подвійних рядів Фур'є. Сформулювали умови сумісності та нерозривності деформування алмаза та зв'язки по поверхні їх взаємодії. Для матеріалу зв'язки склали умову її приєднання до умовно абсолютно жорсткої оправки. Показники напружено-деформованого стану для обох складових робочої частини олівця завдали з використанням довільно обраної функції напружень Ері. Нормальні напруження робочої поверхні абразивного зерна поставили у відповідність прикладеним розподіленим навантаженням. Переміщення поверхні матеріалу зв'язки яка взаємодіє з оправкою прирівняли нулю. Врахували умову сумісності та нерозривності матеріалу зв'язки та абразивного зерна. Отримали системи алгебраїчних лінійних рівнянь шостого порядку. В загальному випадку, в наслідок безмежної кількості складових в рядах Фур'є, кількість систем рівнянь безмежна. В практиці їх кількість обмежують деякою величиною що забезпечує достатній рівень точності отриманих результатів.

Розв'язок обмеженої кількості систем алгебраїчних рівнянь дозволив отримати вирази значень векторів невідомих коефіцієнтів прийнятої функції Ері. А відомі значення коефіцієнтів – показники напружено-деформованого стану системи алмаз-зв'язка. Така послідовність становить алгоритм розрахунку показників напружено-деформованого стану олівця виправлення поверхні шліфувального круга. Відомі допустимі напруження для абразивного зерна та матеріалу зв'язки надали можливість сформулювати умови міцності складових алмазного олівця за відомим характером його механічної взаємодії зі шліфувальним кругом.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей напружено-деформованого стану олівця для відновлення робочої поверхні абразивного круга з комплексним урахуванням механічних властивостей складових інструменту та їх з'єднання, характеру навантаження робочої поверхні. Використання алгоритму дозволить оптимізувати технологічний процес відновлення робочих поверхонь кругів абразивної обробки врахувавши особливості напружено-деформованого стану інструменту їх відновлення, а саме алмазу та матеріалу яким він приєднаний до оправки.

УДК 621.941.01

**О.Д. Євдокимов**, аспірант,  
**В.О. Колесник**, к.т.н.,  
*Сумський державний університет*

## **ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718**

Inconel 718 - це високоякісний сплав на основі нікелю, що широко використовується у машинобудуванні. Основними його перевагами є висока жаростійкість, твердість, стійкість до корозії. Завдяки своїм властивостям він застосовується у авіаційних та ракетних двигунах, газових турбінах, космічних апаратах, автомобільній промисловості та нафтопереробній промисловості. З ростом попиту зростає і попит на обробку цього типу матеріалу. Підвищити продуктивність обробки сплаву можна за рахунок використання покриттів ріжучих пластин, застосування більш ефективних методів охолодження та охолоджуючих рідин. Актуальним є дослідження фізики процесу обробки (дослідження температури, сил різання, стружкоутворення), завдяки чому можна оптимізувати режими обробки та вдосконалити геометрію ріжучого інструменту під певні потреби. Крім того значний вплив на продуктивність обробки має матеріал ріжучого інструменту. Оскільки до складу сплаву входить нікель це підвищує його жаростійкість в процесі експлуатації але разом з тим суттєво впливає на температуру різання суттєво знижуючи температурну стійкість різального інструменту. Основними вимогами до будь-

якого матеріалу ріжучого інструменту, що використовується для токарної обробки сплавів на основі нікелю є хороша зносостійкість, висока твердість та міцність, хімічна стабільність при підвищеній температурі. Для токарної обробки Inconel 718 найчастіше використовують такі матеріали ріжучих пластин: Тверді сплави, CBN (кубічний нітрид бору), PCBN (полікристалічний кубічний нітрид бору) та кераміка.

Твердий сплав (WC-Co) є найпоширенішим матеріалом для виготовлення різальних інструментів у промисловості. Переваги цього типу матеріалу для різання включають відносно низьку вартість, високу міцність та теплопровідність. Завдяки термохімічній стабільності, він досить добре підходить для обробки Inconel 718, але обмежений діапазоном швидкостей різання від 30 м/хв до 70 м/хв. Використання твердого сплаву при швидкостях різання та подачах, що перевищують рекомендовані, скорочує термін служби інструменту, що в свою чергу робить його непридатним для високошвидкісної токарної обробки.

Кубічний нітрид бору (CBN) - один із найтвердіших матеріалів, що зазвичай використовується для чорної обробки загартованих сплавів та чавуну. Кубічний нітрид бору (CBN) може обробляти нікелеві суперсплави з твердістю понад 35 HRC при швидкостях різання від 200 до 350 м/хв. CBN має високу теплопровідність, стійкість до високих температур та термічну стабільність. Значним недоліком інструменту з кубічного нітриду бору є його вартість, що в приблизно десять раз більша за інструмент з твердого сплаву або кераміки. Це обмежує застосування цього типу матеріалу для промислової обробки Inconel 718.

Полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN) матеріал що створено на основі кубічного нітриду бору в поєднанні з керамікою, такою як TiN або TiCN. Кераміка виступає як зв'язуючий матеріал для кристалів CBN. Ріжучі пластини з PCBN поділяються на два типи - з низьким вмістом кубічного нітриду бору CBN (40-70%) та з високим вмістом CBN (85-90%). Пластини з PCBN можуть витримувати температури різання понад 1000 °C, а ріжучий клин може бути гострішим завдяки покращеній міцності інструментів PCBN. Це робить їх гарним вибором для чистових та фінішних операцій обробки Inconel 718, та дозволяє застосовувати цей тип інструментального матеріалу при вищих швидкостях різання, ніж твердосплавні та керамічні інструменти. Під час обробки інструментом PCBN оброблена поверхня має більш однорідну якість та кращу шорсткість. Суттєвим недоліком цього типу інструментів є їх висока вартість (у порівнянні з твердосплавним інструментом та керамікою), але вона нижча, ніж вартість інструментів CBN.

Кераміка в основному використовується для обробки твердих матеріалів в промисловості завдяки її унікальним механічним властивостям. Висока термостійкість керамічних інструментів робить їх вдалим вибором для високошвидкісної обробки матеріалів з високою корозійною стійкістю та твердістю. У порівнянні з твердосплавними пластинами, вони мають довший термін служби. Керамічні інструменти на основі оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) та

нітриду кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) підходять для обробки нікелевих сплавів та Inconel 718. Твердість кераміки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  може бути підвищена за допомогою додавання  $\text{ZrO}_2$ , а термічна стійкість - за допомогою додавання  $\text{TiC}$  та  $\text{TiN}$ . Оксид алюмінію у поєднанні з  $\text{TiC}$  покращує термічні властивості ріжучого інструменту. Глиноземна кераміка ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ ) з підсиленням волокнами може досягати швидкостей різання від 200 до 750 м/хв.

### Література:

1. Yevdokymov, O.; Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Vopat, T.; Gupta, M.K.; Lisoenko, D.; Dovhopolov, A. Pareto Analysis of Machining Factors Significance When Turning of Nickel-Based Superalloy Inconel 718. *Metals* 2023, 13, 1354.

УДК 669-1

**І.А. Бойко**, к.т.н.,<sup>1</sup>

**Ю.О. Коваль**, аспірант,<sup>2</sup>

**Н.О. Козаченко**, магістр,<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*АТ «Мотор Січ»*

<sup>2</sup>*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## ВИКОРИСТАННЯ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ В ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Сучасне машинобудування все частіше вимагає використання важкооброблюваних жароміцних матеріалів, що обумовлено важкими умовами роботи деталей.

Розрізняють такі групи жароміцних сталей і сплавів:

1. **Перлітні сталі.** Сталі перлітного класу використовують для виготовлення кріплення, труб, паропроводів, пароперегрівачів і колекторів енергетичних установок, які тривалий час працюють при температурах 500-550°C. Межа міцності цієї групи сталей 600 – 800 МПа [4]. Перлітні сталі містять відносно малу кількість вуглецю і звичайно леговані хромом, молібденом і ванадієм (12ХМ, 12Х1МФ та інші) [1].

2. **Мартенситні сталі.** Сталі мартенситного класу використовують для виготовлення деталей енергетичного устаткування (лопатки, діафрагми, турбінні диски, ротори), які тривалий час працюють при температурах 600-620°C. Межа міцності цієї групи сталей 550 – 1100 МПа [4]. Сталі значно більш леговані хромом, а також леговані вольфрамом, молібденом, ванадієм (12Х18Н10Т, 20Х23Н13, 15Х11МФ, 15Х12ВНМФ та інші) [1].

3. **Аустенітні сталі.** З них виготовляють ротори, диски, лопатки газових турбін, клапани дизельних двигунів, які працюють при температурах 600-700°C. Межа міцності цієї групи сталей 700 – 1000 МПа [4]. Хромонікелеві

аустенітні сталі для збільшення жароміцності додатково легують вольфрамом, молібденом, ванадієм, ніобієм, бором й іншими елементами (09X14H16B, 09X14H19B2BP, 45X14H14B2M та інші) [1].

**4. Сплави на нікелевій основі.** Ці сплави працюють при температурах до 700-900 °С. До сплавів на нікелевій та залізонікелевій основі відносять (ХН60ВТ, ХН77ТЮР, ХН80ТБЮ та інші) з більшим вмістом легуючих елементів: хрому (10–20 %) та меншим вмістом титану, алюмінію, вольфраму, молібдену та інших. Межа міцності цієї групи сталей 800 – 1200 МПа [4]. Застосовуються при виготовленні дисків, робочих та направляючих лопаток та інших деталей газових турбін [1].

Також до жароміцних матеріалів слід віднести такі матеріали як керамічні та тугоплавкі.

**Керамічні матеріали** на основі SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, системи Si-Al-O-N застосовують для виготовлення поршнів, головок блока циліндрів двигунів внутрішнього згорання. Деталі з цих матеріалів здатні працювати при температурах більше 1500-1700 °С. Недоліками керамічних матеріалів є крихкість і відносна технологічна складність виготовлення деталей [2].

**Тугоплавкі матеріали** призначені для роботи при температурах більше 1000°С. Найбільше застосування в техніці знаходять тугоплавкі метали, що мають такі температури плавлення: Сг - 1900°С, Nb - 2415°С, Мо - 2620°С, Та - 3000°С, W - 3410 °С [2].

Основною причиною низької оброблюваності даних матеріалів - це значні силові напруження, та висока твердість деталей, як наслідок, виникнення високої температури в зоні різання [3].

### **Література:**

1. Бялік О.М. Металознавство: Підручник /О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – 2-ге вид., перероб. і доп.- К.: Політехніка, 2006. – 384 с.
2. Дурягіна З.А. Сплави з особливими властивостями / З.А. Дурягіна, О.Я. Лизун, В.Л. Пілюшенко. – Л. : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. – 236 с.
3. Бойко І.А. Особливості використання та обробки функціональних покриттів деталей авіаційних двигунів / І. Бойко [та ін.] // “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023” : Зб. тез доп. III- ї Міжнар. науково-техн. конф., Вінниця, 1–3 черв. 2023 р. – Вінниця, 2023. – С. 252–253.
4. Глембоцька Л. Є. Проблеми обробки важкооброблюваних матеріалів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2014. – С. 22–23.

УДК 621.9.06

**А.В. Демчук**, аспірант,  
**П.М. Русин**, магістр,  
**Т.І. Четвержук**, к.т.н. доцент,  
*Луцький національний технічний університет*

## **АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ**

Застосування для ряду адаптивних систем як вхідного сигналу рівня вібрацій, що виникають при різанні, вимагає розвитку методів аналітичного визначення стійкості та амплітуд автоколивань верстатів при різанні, а також забезпечення динамічної та статичної точності токарного верстата на стадії його проектування.

Проблема коливань верстатів тісно пов'язана з питаннями автоматизації виробництва, впровадженням верстатів з числовим програмним управлінням і автоматизованих систем управління виробничими процесами.

Значний внесок в дослідження коливань металорізальних токарних верстатів внесли вітчизняні учені, зокрема Ковальов В.Д., Кузнецов Ю.М., Решетов Д.Н., Струтинський В.Б., Луців І.В., Мельничук П.П. та багато інших вчених. Вагомий внесок у вирішення актуальних проблем процесів токарного оброблення зробили вітчизняні вчені Равська Н.С., Клименко С.А., Грицай І.Є., Залого В.О., Грабченко А.І., Пермяков О.А., Внуков Ю.М. й інші.

Для пояснення виникнення автоколивань застосовують модель Ван-дер-Поля, використовуючи аналогію між спадаючою характеристикою тертя в моделі і спадаючою характеристикою різання. Розглянутий механізм вторинного збудження вібрацій, пов'язаний із співпадінням змінного через вібрації припуску із самими вібраціями за частотою і фазою. Верстат розглядається як система з декількома ступенями вільності. Розглянутий вплив на вібрації окремих механізмів: зміни сил тертя на різець через зміну швидкості відносних коливань ріжучого інструменту і заготовки та зміни сили різання, яка виникає унаслідок зміни робочих кутів різця при вібраціях. При розгляді вібрацій показаний вплив пластичних деформацій і теплових явищ на сили тертя при різанні [5].

Відмінним методом є експериментально зміряні колювання вузлів верстата і сили різання при вібраціях, досліджений вплив параметрів верстата і схем обробки на частоту і інтенсивність коливань, торкнеться питання про розсіяння енергії при вібраціях.

Частково вирішується задача стійкості руху в спрощеній системі [3]. Токарний верстат розглядається як коливальна система з декількома ступенями вільності. Стійкість в системі з двома ступенями вільності та координатним зв'язком без врахування затухання розглядається в загальному вигляді. Для виникнення коливань в такій системі рух ріжучого інструменту щодо оброблюваної заготовки обов'язково повинен описуватися неоднозначною траєкторією, наприклад еліпсом. Як основна рекомендація по боротьбі з

вібраціями запропоновано відповідним чином зорієнтувати осі жорсткості верстата. Розглянуто і вторинне збурення як особливий вид стійкості руху в системі, на яку впливають сили, які описуються функцією з аргументом із запізненням. Цікаво це тим, що вона є однією з перших спроб оцінити багатогранний вплив пружної системи верстата на його стійкість при різанні. Недоліком її є вузький і спрощений підхід до такого складного явища, як вібрації в певних станах. Розрахунки мають частковий характер, їхній збіг з експериментом в основному лише якісний. Експериментально одержана величина спізнення для деяких режимів різання і матеріалів. Використовування функцій з аргументом, що спізнюється, незручне в розрахунках, тому що виконується спрощення і в результаті одержується диференціальне рівняння першого порядку, яке пов'язує силу різання, її першу похідну за часом і відносний зсув ріжучого інструменту і оброблюваної заготовки. Таке представлення сили різання дозволяє пояснити явище нестійкості навіть у тому випадку, коли пружна система має один ступінь свободи за рахунок динамічної неоднозначності сили різання. Автоколивання можуть виникати у тому випадку, якщо траєкторія ріжучого інструменту щодо оброблюваної заготовки є однозначною кривою, в окремому випадку, прямою, що спостерігається в системі з одним ступенем вільності.

При аналізі коливань токарних верстатів використовується апарат випадкових функцій, але випадковими вважаються в основному лише збурення, а пружні системи верстатів описуються детермінованими рівняннями, оскільки визначення коефіцієнтів цих рівнянь ґрунтується на детермінованих методах, прийняті в розрахунках деталей машин. Найбільше застосування апарат випадкових функцій одержав при розрахунку віброізоляції машин.

Перспективним методом є застосування до динамічного розрахунку верстатів теорії оптимальних процесів, яка вже використовується при рішенні деяких задач машинознавства [3]. У верстатах токарної групи з обертальним головним рухом це зроблено при вдосконаленні конструкції і технології виготовлення шпинделів і шпиндельних бабок. При складанні та написанні програм для верстатів з числовим програмним управлінням став можливим аналіз багатьох параметрів процесу різання і вибір оптимальних режимів різання з урахуванням різних обмежень, зокрема з урахуванням обмеження по вібростійкості. Норми на вібростійкість стали невід'ємною частиною технічних умов верстата.

Важливим напрямом є розроблення методів розрахунків верстатів на стійкість і коливання на стадії проектування. Ці розрахунки становлять інтерес для конструкторських бюро верстатобудівних заводів. Вони сприяють пришвидшенню проектування, підвищенню його якості та зменшенню витрат на виготовлення різних варіантів верстатів. Виконані за допомогою сучасних CAD/CAM/CAE пакетів розрахунки є частиною системи автоматизації конструкторських робіт. Роботи в цій області ведуться у напрямі розробки і



спрощення розрахункових схем верстатів та уточнення динамічних характеристик процесу різання.

В даний час накопичено досвід раціонального конструювання елементів несучих систем токарних верстатів. Подальші кроки в цьому напрямку пов'язані з використанням при розрахунках несучих систем токарних верстатів [4] методу кінцевих елементів в поєднанні з багатофакторною оптимізацією.

У роботі [1] використано підхід до параметричної оптимізації несучої системи токарного верстату на основі узагальненого критерію, що враховує загальну масу корпусних деталей верстата і складові відносного переміщення інструменту і заготовки під дією сил різання. При реалізації такого підходу встановлені вагові коефіцієнти всіх вказаних показників. Проте ці коефіцієнти апріорно невідомі і можуть змінюватися залежно від тенденцій розвитку конструкцій верстатів. Крім того, при суперечливих показниках якості застосування узагальненого критерію не виключає покращення одного з показників за рахунок інших.

При рішенні задачі багатокритеріальної оптимізації спочатку виділяють безліч так званих ефективних варіантів (множина Парето), а потім відповідно до якої-небудь системи переваг вибирають з них один. Для виділення безлічі ефективних варіантів можна застосувати, наприклад, лінійний пошук. Проте для рівномірного зондування всього простору керованих параметрів при ЛП пошуку потрібно розрахувати параметри якості в порівняно великому числі точок цього простору (наприклад, при семи-дев'яти варіюваних параметрах), що вимагає значних витрат машинного часу.

В цьому випадку доцільніше використовувати метод направленої пошуку (наприклад, методи «найшвидшого спуску» при міні-максному підході до вибору цільової функції). Ще більшу економію часу пошуку може дати використання теорії чутливості, що дозволяє оцінювати напрям і швидкість зміни показників якості конструкції при зміщенні вектору  $V$  варіюваних параметрів щодо його номінального значення (відповідного базовому варіанту верстата).

Підводячи підсумки, слід відмітити, що вищевказані методи розрахунків і дослідження несучих систем токарних верстатів та актуальні задачі динаміки, які направлені на їх удосконалення є першочерговими для швидкого отримання практичних результатів, відповідно це не виключає необхідності проведення таких важливих робіт, як поглиблене вивчення процесів різання і тертя, демпфування і т.п.

### **Література:**

1. Chetverzhuk T., Zabolotnyi O., Sychuk V., Polinkevych R., Tkachuk A.: A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC), Vol. 3, No. 4, pp. 37-47. International Association of Educators and Researchers (IAER). (2019). <https://doi.org/10.33166/AETiC.2019.04.004>.

2. Chigbogu G. O., Sam N. O. Time Domain Chatter Stability Comparison of Turning and Milling Processes // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering. – 2012. – Т. 3, № 11. – С. 25-30.

3. Гагалюк А.В., Духнич Ю.П., Дерлиця К.А. Дослідження навантажувальної здатності несучої системи токарного верстата аналітичним методом. / Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конференції молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27-28 листопада 2019.) – Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 59 – 60.

4. Ковальов В. Д., Антоненко Я. С., Виганяйло Б. Ю. Натурні випробування крутної жорсткості станин важких токарних верстатів. Вісник НТУ «ХП». Технологія в машинобудуванні. Харків, 2017. 26 (1248). С. 94-98.

5. Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Полінкевич Р.М., Залета О.М., Валецький Б.П. (2022). Проблеми та задачі проектування та розрахунку несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням навантажень. Наукові нотатки, (73), С. 101-104.

УДК 621.9.04-868

**В.Б. Струтинський**, д.т.н., професор,  
**Ю.М. Данильченко**, д.т.н., професор,  
**Ю.Й. Бесарабець**, к.т.н., доцент,  
**О.А. Плівак**, зав. лаб.,  
**В.С. Павлун**, студентка,

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*

## **СПЕЦІАЛЬНІ НАЗЕМНІ РОБОТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗМІНУВАННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Значна територія України замінована або насичена вибухонебезпечними об'єктами. Тому розроблення засобів ефективного розмінування місцевості є актуальною науково-технічною проблемою. На сьогодні у світі є досить багато способів і різноманітних систем, призначених для вирішення проблем гуманітарного розмінування. Перспективним є розроблення технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів [1] на базі штучного інтелекту, що повністю відповідає і світовим тенденціям [2]. Застосовуються також і мобільні наземні роботизовані системи і комплекси з різним ступенем автономності [3], але безпечність їх використання технологічно обмежена ефективністю методів виявлення мін та міноподібних об'єктів [4]. З іншого боку, мобільні наземні роботизовані системи можуть бути використаними для додаткового наземного дообстеження «проблемних» ділянок місцезоміщення вибухонебезпечних предметів, виявлених на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки,

тобто увійти до складу інтелектуальної гнучкої робототехнічної системи розмінування [2], сформованої на базі уніфікованих підсистем міжтипового призначення [4].

Сучасні наземні роботизовані комплекси розмінування [5] забезпечують пошук, ідентифікацію небезпечних об'єктів та їх знешкодження [6]. Роботизовані комплекси розмінування мають рухому платформу з колісним або гусеничним шасі та маніпулятор. Застосовуються маніпулятори різного виду, зокрема пристрої з паралельними кінематичними зв'язками [7]. Для таких комплексів розроблені та досліджені різноманітні схемні і конструктивні рішення маніпуляторів, а також створені системи їх керування [8]. Але підвищення безпечності використання роботизованих комплексів розмінування потребує застосування нових підходів до їх конструювання як з позиції зменшення навантаження на ґрунт, так і віддаленості рухомої платформи від зони обстеження.

Запропонована технологія розмінування на основі штучного інтелекту включає багатоелементну систему пошуку та знешкодження мін і боеприпасів, яка реалізується спеціальними наземними роботизованими комплексами, оснащеними надлегкими маніпуляторами (масою до 5 кг) з розширеним робочим простором та віддаленою зоною обслуговування (4..8 м) (рис. 1).

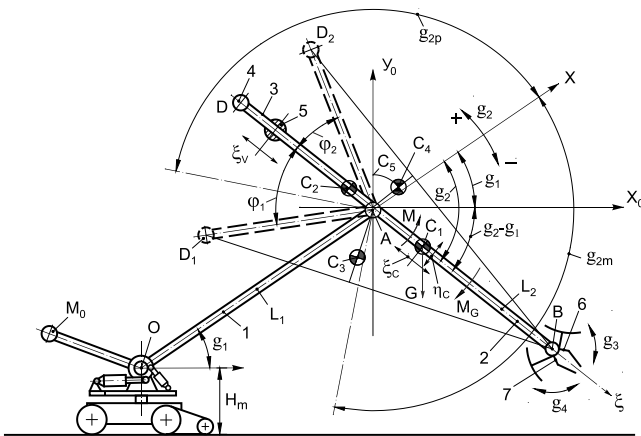


Рис. 1. Схема розробленого спеціального наземного роботизованого комплексу, оснащеного надлегким маніпулятором з розширеним робочим простором для реалізації технології розмінування на основі штучного інтелекту

Маніпулятор має важелі 1 і 2 значної довжини (2..3 м), з'єднані шарніром  $A$ . Маніпулятор в цілому статично зрівноважується відносно вісі повороту  $O$  балансиrom із масою  $M_0$ . Важіль 2 має індивідуальну систему статичного та динамічного зрівноваження у вигляді балансира, що включає штангу 3, жорстко з'єднану з важелем 2. На кінці штанги 3 розміщено інерційний демпфер коливань 4, а на самій штанзі встановлено вантаж 5,

виконаний з можливістю переміщення  $\zeta_v$  в напрямку вісі штанги та фіксації у необхідному місці штанги.

Особливістю розробленого спеціального наземного роботизованого комплексу є централізація силових систем і приводів маніпулятора на шасі роботизованого комплексу із формуванням каналів передачі потужності до вузлів маніпуляторів у вигляді механічних трансмісій на базі мінітросових систем, що використовують надміцні кевларові троси малого діаметру, а також вбудовані пневмокомунікації та електричні і оптоволоконні кабельні системи. Механічні трансмісії проходять в порожнинах важелів 1 і 2 та в шарнірі А.

На кінці важеля 2 в точці В встановлено подвійний шарнір із рухомими пальцями схвату 6 і 7, на яких встановлені опукле та увігнуте дзеркала для візуального огляду місцевості. На пальцях схвату встановлюються оптичні, термічні, тактильні, ударні, акустичні та інші пристрої знаходження мін та інших небезпечних об'єктів (на рисунку не показані).

Надлегкий маніпулятор з розширеним робочим простором має систему статичного врівноваження важелів. Це забезпечує можливість роботи маніпулятора у віддаленій зоні обслуговування (4.8 м). Передбачена система динамічного врівноваження важеля 2 та демпфування коливань окремих вузлів і елементів маніпулятора. При роботі системи автоматично змінюється розподіл мас відносно осей обертання шарнірів. Із врахуванням наявності балансира, загальний центр мас важеля 2 знаходиться в точці  $C_1$  та має невелике зміщення у напрямках  $\zeta_C$  та  $\zeta_C$ , обумовлене переміщенням пальців схвату. Центр мас важеля 2 може бути автоматично зміщений по вісі важеля переміщенням  $\zeta$  вантажу 5. Центр мас буде знаходитись між крайніми положеннями  $C_1$  та  $C_2$  і в ідеальному випадку попадає на вісь шарніра А. При цьому буде мати місце повне статичне і динамічне врівноваження системи важеля 2.

Цілеспрямований перерозподіл мас надлегкого маніпулятора забезпечується на основі запропонованих методів аналізу нечітко визначених тензорних полів тензорів моментів інерції протяжних пружно-деформованих елементів важільної системи маніпуляторів, запропонованих нових методів спектрального аналізу тензорних полів тензорів моментів інерції із встановленням областей сингулярності тензорного поля пружно-деформованих елементів маніпулятора та розкладу тензорного поля в околиці області сингулярності в ряди Тейлора із застосуванням спеціально введених синусоїдальних тензорних полів, утворених тензорами другого, третього і вищих рангів для побудови оптимальних з точки зору інерційності динамічних систем надлегких маніпуляторів [9].

Розроблені системи активного перерозподілу мас базуються на використанні впливу сил інерції переносних рухів (сил Кориоліса) на пружну систему маніпулятора. При цьому змінюються параметри тензорного поля тензорів моментів інерції (тензори другого рангу), що визначають інерційні властивості пружно-деформованих вузлів маніпулятора з обчисленням тензорів градієнтів (тензори третього рангу) та їх використання для корекції параметрів тензорів моментів інерції основних вузлів маніпулятора. Проведено теоретичне

обґрунтування ефективності застосування сил Коріоліса для підвищення якості систем керування надлегких маніпуляторів, поліпшення їх статичних і динамічних характеристик.

Підвищення показників якості та надійності роботи надлегких маніпуляторів здійснено введенням спеціальних механізмів фіксації та гальмування рухомих ланок маніпуляторів, демпферних систем, механізмів введення системи паралельних кінематичних зв'язків у важільних системах маніпуляторів, механізмів натягу та фіксації положення тросів малого діаметру, механізмів стабілізації зусиль в тросових системах, механізмів акселерації переміщення тросів та засобів виміру натягу тросів, механізмів імпульсної передачі потужності на базі мінітросових систем. Забезпечено підвищення ефективності мінітросових систем на основі проведених теоретичних досліджень із застосуванням багатовимірних стохастичних символічних (узагальнених) функцій для розв'язку задач аналізу і синтезу різномасштабних процесів, що мають місце в мінітросових трансмісіях для передачі потужності.

Розроблені пристрої спрямування руху тросів, зміни їх напрямку, пристрої об'єднання тросів у пасма (пакети) та розділення пакетів тросів на окремі складові. Розроблені статичні силові (шпренгелльні) мінітросові системи для забезпечення необхідних параметрів міцності та жорсткості важелів надлегких маніпуляторів. Також запропоновані динамічні мінітросові системи аналогової та імпульсної дії для передачі потужності на окремі вузли маніпуляторів, розміщені в віддаленій зоні обслуговування. Здійснена постановка і розв'язок задач статистичної динаміки попередньо напружених мінітросових систем різноманітної просторової структури.

Розроблені інноваційні системи динамічної стабілізації надлегких маніпуляторів з використанням гіроскопів, встановлених на важелях. При цьому обертання гіроскопів здійснюється за допомогою імпульсних приводів із застосуванням мінітросових трансмісій. На важелях також встановлюються аеродинамічні пропелерні пристрої, побудовані за коптерним принципом для підвищення вантажопідйомності та стабілізації положення маніпуляторів при дії вітрових навантажень. Схемні і конструктивні рішення маніпулятора та його елементів планується уточнити за результатами досліджень експериментального зразка маніпулятора.

Розроблено методи пошуку та знешкодження мін та боєприпасів пристроями надлегких маніпуляторів із віддаленою зоною обслуговування. Запропоновані спеціальні якорі–кішки розмінування, адаптовані до надлегких маніпуляторів, імітатори ходи людини, динамічні вібраційні та ударні пристрої маніпуляторів. Розроблені способи видалення вибухонебезпечних предметів із зони обслуговування маніпулятора спеціально розробленими захватними пристроями. Окремі способи знешкодження мін обґрунтовані і перевірені експериментально [10]. Запропоновано інноваційне схемне рішення наземного роботизованого комплексу, оснащеного маніпулятором, який має приводи важелів та прецизійні приводи мікропереміщень у вигляді механізму-гексаподу ([11], рис. 2,а).

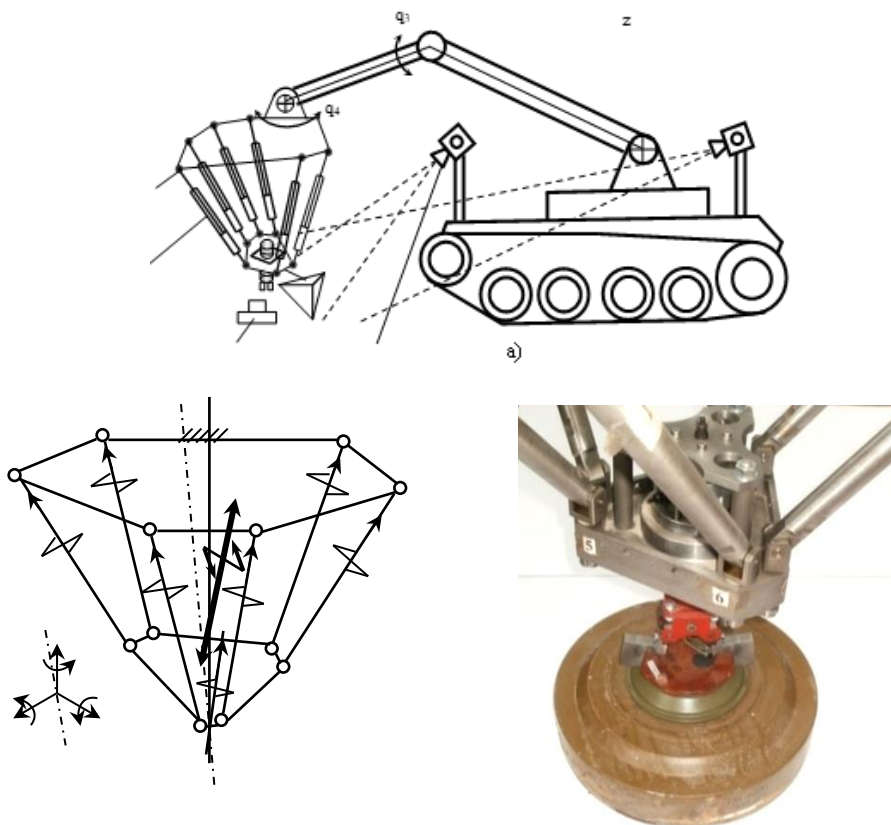


Рис. 2. Схема наземного роботизованого комплексу, що має гібридну систему приводів маніпулятора для роботи з небезпечними об'єктами (а), сприйняття зовнішніх навантажень стрижневою системою механізму-гексаподу (б) та хватний пристрій, використаний для експериментального визначення моментів закручування та відкручування підривача протитанкової міни (в).

## Висновки

1. Запропоновані спеціальні наземні роботизовані комплекси, оснащені надлегкими маніпуляторами з розширеним робочим простором та віддаленою зоною обслуговування для реалізації технології розмінування на основі штучного інтелекту є ефективним доповненням до технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів.

2. Технології розмінування на базі штучного інтелекту, що використовують надлегкі маніпулятори з віддаленою зоною обслуговування при своєму

подальшому розвитку дадуть надійні і ефективні засоби пошуку та знешкодження вибухонебезпечних об'єктів.

3. Обґрунтування та експериментальна перевірка запропонованих способів знешкодження мін маніпуляторами роботизованих комплексів підтвердила їх ефективність.

4. Основним напрямком подальших досліджень є вдосконалення конструкції та експериментальна перевірка надлегких маніпуляторів з розширеним робочим простором та віддаленою зоною обслуговування.

### **Література:**

1. Попов М.О. Технологія дистанційного виявлення мін на основі аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів: стан та перспективи: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 6 квітня 2022 року. Вісник НАН України. 2022, №5 - С 56–62.  
<https://doi.org/10.15407/visn2022.05.056>

2. Swett, B.A., Hahn, E.N., Llorens, A.J. (2021). Designing Robots for the Battlefield: State of the Art. In: von Braun, J., S. Archer, M., Reichberg, G.M., Sánchez Sorondo, M. (eds) Robotics, AI, and Humanity. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6_11)

3. Marques, L., Almeida, A. T. de, Armada, M., Fernández, R., Franceschi, H. M., González, P. D., & Baudoin, Y. (2016). State of the Art Review on Mobile Robots and Manipulators for Humanitarian Demining.  
<http://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/2401>.

4. Кириленко В.А. Глобальна проблема розмінування: стан та підходи до розв'язання / В.А. Кириленко, В.Р. Нероба //Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського. 2019, №2(66) – С. 115-119. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/115-119>

5. Petrișor, S.M., Simion, M. (2021). Aspects Regarding the Elaboration of the Geometric, Kinematic and Organological Study of a Robotic Technological Product “Humanitarian PetSim Robot” Used as an Avant-Garde Element of the Human Factor in High Risk Areas. In: Arai, K., Kapoor, S., Bhatia, R. (eds) Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1250. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55180-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55180-3_24)

6. Jaradat, M.A., Bani-Salim, M. & Awad, F. A Highly-Maneuverable Demining Autonomous Robot: an Over-Actuated Design. J Intell Robot Syst 90, 65–80 (2018).  
<https://doi.org/10.1007/s10846-017-0654-y>

7. Кропівний О.О. Кінематичні залежності двокоординатного механізму паралельної структури з поворотним кріпленням шарнірів штанг змінної довжини / О. О. Кропівний, А. І. Гречка, А. М. Кириченко, К. К. Щербина // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2022. - Вип. 5(2). - С. 22-30. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.22-30](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.22-30)

8. Дмитрієв Д.О. Функціональні можливості і керування просторовими системами приводів для різних технологічних задач / Д. О. Дмитрієв, С. А.

Русанов, Д. Д. Федорчук // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2019. № 2(1). – С. 48-54. ISSN 2078-4481 <https://journals.kntu.net.ua/index.php/visnyk/article/view/400>

9. Струтинський, В. Б. Наземні роботизовані комплекси: монографія /Струтинський В. Б., Гуржій А. М. - Житомир : ПП «Рута», 2023. - 497 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57111>

10. Strutynsky, V., Kotsiuruba, V., Dovhopoliy, A., Husliakov, O., Budianu, R., Kolos, O., & Hrechka, I. (2019). Substantiating the requirements to functional indicators for the manipulators of mobile robotic demining complexes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/7(101), p.p. 42–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178466>

11. Мобільний робототехнічний комплекс з дистанційним керуванням: пат. 127035 Україна: В25J 5/00, В25J 9/00, В25J 5/02 (2006.01), В25J 9/06 (2006.01), В25J 19/00, В25J 19/04 (2006.01) / В.Б. Струтинський; А.М. Гуржій; С.Ю.Вакуленко; В.В. Новак. - № а201908587; заявл. 18.07.2019; опубл. 22.033.2023, Бюл. № 12/2023.

УДК 621.9.04-868

**В.Б. Струтинський**, д.т.н., професор,<sup>1</sup>

**Ю.М. Данильченко**, д.т.н., професор,<sup>1</sup>

**А.М. Гуржій**, д.т.н., професор,<sup>2</sup>

**С.В. Майданюк**, к.т.н.,<sup>1</sup>

**В.С. Павлун**, студентка,

*Національна академія педагогічних наук України,<sup>2</sup>*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»<sup>1</sup>*

## **ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ МІСЦЕВОСТІ СПЕЦІАЛЬНИМИ НАЗЕМНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

На сьогодні у світі є досить багато способів і різноманітних систем, призначених для вирішення проблем гуманітарного розмінування. Переважно це технічні прилади, і мобільні наземні системи з різним ступенем автономності [1], але їх оперативність при обстеженні великих площ і безпечність використання технологічно обмежена ефективністю методів виявлення мін та міноподібних об'єктів [2]. Найбільші очікування в Україні пов'язують з розроблення нової технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів [3] на базі штучного інтелекту, що повністю відповідає і світовим тенденціям [4]. При цьому в [3] зазначається, що ймовірність правильного



дистанційного виявлення мін з використанням БПЛА є досить високою і відповідає світовим вимогам до подібних систем військового призначення, але для цілей гуманітарного розмінування ефективність технології має бути більшою. Підвищити ефективність можливо шляхом додаткового наземного дообстеження «проблемних» ділянок місцезоміщення вибухонебезпечних предметів, виявлених на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів, але це потребує додаткового апаратурного і технологічного вдосконалення мобільних наземних систем, зокрема і шляхом застосування тактильних, акустичних, та інших методів сканування місцевості.

Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на безпілотних літальних комплексах [5] вказує на можливість застосування подібних методів і засобів збирання і оброблення інформації і за допомогою наземних комплексів. Цьому відповідає і концепція розвитку робототехнічних комплексів для розмінування, яка передбачає розширення їх функціональних можливостей для можливого застосування у нових напрямках завдяки створенню нових конструктивних схем або використанню уніфікованих підсистем міжтипового призначення [2].

Технологія розмінування включає аналіз системою штучного інтелекту попередніх гіпотез про наявність на місцевості небезпечних об'єктів, сформованих за результатами автоматизованого аналізу системою штучного інтелекту матеріалів зйомки місцевості з безпілотних літальних апаратів [5].

Результати аналізу попередніх гіпотез є основою для побудови централізованої платформи управління на базі системи штучного інтелекту. Для об'єктивної оцінки стану місцевості і уточнення гіпотез проводиться загальний огляд місцевості із максимальної висоти в межах робочого простору маніпулятора. Власне пошук небезпечних об'єктів здійснюється при детальному огляді місцевості оптичними та іншими засобами, які входять в інструментарій маніпулятора наземного роботизованого комплексу. Оптичні засоби використовують відеокамери з різними полями огляду та можливістю роботи в різних оптичних діапазонах, зокрема, інфрачервоному та ультрафіолетовому. За результатами огляду системою штучного інтелекту робиться висновок про рівень доступності небезпечних об'єктів на місцевості та необхідні дії по її покращенню.

Запропоновані наземні роботизовані комплекси забезпечують ідентифікацію та покращення доступності небезпечних об'єктів на місцевості шляхом очищення та видалення сторонніх предметів. Очищення підозрілих предметів на місцевості здійснюється безконтактними методами (обдув повітрям) або спеціальними пристроями, які входять в інструментарій маніпулятора наземного роботизованого комплексу. За результатами очищення місцевості системою штучного інтелекту робиться висновок про пошук та ідентифікацію небезпечних об'єктів на місцевості шляхом її фізичного сканування. Централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту забезпечує застосування

тактильних, ударних, термічних, акустичних та інших методів знаходження мін та інших небезпечних об'єктів. Використовуються енергозберігаючі динамічні системи пошуку мін спеціальними пристроями, які приводяться в дію дистанційними приводами. Розроблено відповідне оснащення для фізичного сканування місцевості, засоби вимірювання та попередньої обробки інформації.

Розроблена централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту здійснює цифровізацію інформації, одержаної в результаті фізичних методів сканування місцевості. Сканування місцевості проводиться в межах секторіальної області  $Q$  робочого простору маніпулятора. При цьому область розбивається на елементарні ділянки огляду розміром  $\Delta\varphi \times \Delta\rho$ . Центр ділянки  $P(ij)$  є точкою входу в позицію виконавчого пристрою маніпулятора, яка звичайно реалізується із певною похибкою. Точка позиціонування виконавчого пристрою маніпулятора  $P(ij)$  індексується в межах області. При цьому індекс  $(i)$  індексує зміни радіусу, а індекс  $(j)$  зміни полярного кута. Дана схема індексації відповідає матриці розмірністю  $n \times m$ , де  $n$  число рядків, а  $m$  число стовпців. Номер рядка  $(i)$  відповідає зміні радіусу  $\rho$  з дискретністю  $\Delta\rho$ , а номер стовпчика матриці  $(j)$  відповідає полярному куту  $\varphi$ , який змінюється з дискретністю  $\Delta\varphi$ . Рациональним є вибір однакових значень зміни кута  $\varphi$  в межах області  $Q$ , тобто  $\varphi = const$ . Зміни радіусу  $\Delta\rho$  вибираються різними в межах робочого простору.

Область робочого простору  $Q$  орієнтується за напрямком переміщення шасі наземного роботизованого комплексу. Секторіальна область  $Q$  робочого простору обрана із умови сканування всіх ділянок поверхні при покроковому переміщенні шасі комплексу. Введена спеціальна сітка точок позиціонування виконавчого пристрою маніпулятора в плані є основою для формування спеціальної сіткової інформаційної технології аналізу цифрових фрагментів сканограм поверхні на базі штучного інтелекту. Спеціальна сітка точок сканування  $P(ij)$  враховує особливості конструкції надлегкого маніпулятора, зокрема точність позиціонування важелів у просторі та закони зміни керованих координат маніпулятора, наявність поворотних пальців схвату та механізмів мікропереміщень, які застосовуються для фізичного сканування поверхні. Застосовуються раціональні зигзагоподібні схеми формування матриць по рядкам або стовпчикам( рис.1, а і б).

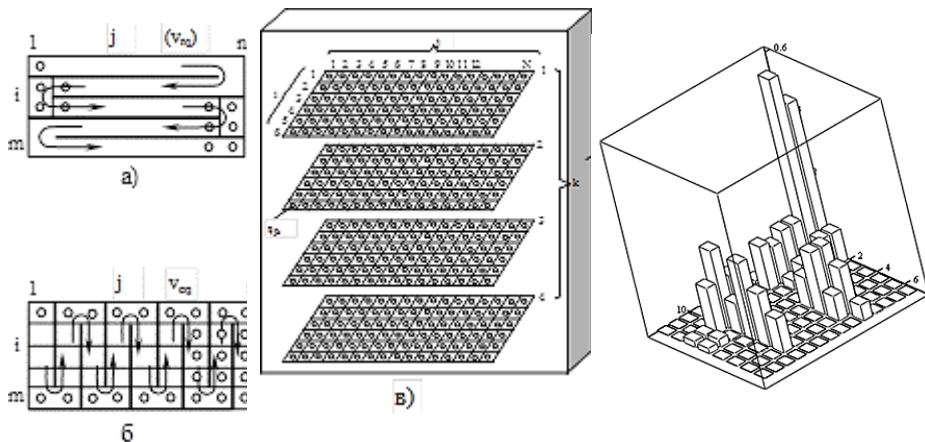


Рис. 1. Схеми формування матриць по рядкам (а) та стовпчикам (б), графічне зображення просторової тривимірної матриці (в) та візуалізація матриці  $I_{ij}^e$ , одержаної в результаті згортки просторової тривимірної матриці (г), яка визначає наявність небезпечних об'єктів на місцевості

В результаті тактильних, ударних, термічних, акустичних та інших методів фізичного сканування місцевості в межах секторіальної області  $Q$  визначається масив кількох десятків матриць параметрів, які відображають наявність небезпечних об'єктів на елементарних ділянках місцевості. За результатами попереднього аналізу кожної матриці на предмет її значущості, системою штучного інтелекту робиться висновок про узагальнення одержаної інформації.

Одержані матриці структуруються до виду просторової тривимірної матриці [6] (рис.1, в). В індексному записі просторова матриця подається у вигляді своїх компонент:

$$T = (t_{ijk}), i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,p. \quad (1)$$

Горизонтальні зрізи тривимірної матриці являють собою двовимірні матриці, які містять у цифровому вигляді інформацію про наявність мін та інших небезпечних об'єктів на місцевості:

$$T_1 = (t_{ijk1}), T_2 = (t_{ijk2}), \dots T_n = (t_{ijp}). \quad (2)$$

За результатами аналізу зрізів тривимірної матриці системою штучного інтелекту виділяється базова просторова тривимірна матриця, яка містить сутєву інформацію про наявність небезпечних об'єктів в межах секторіальної області  $Q$  місцевості та проводиться згортка даної матриці. Визначаються

компоненти узагальнюючої плоскої матриці  $I_{ij}^e$ , одержаної в результаті згортки просторової тривимірної матриці по індексу  $k$  (рис.1, г).

Системою штучного інтелекту проводиться аналіз узагальнюючої матриці із застосуванням моментів різних порядків. Обчислюється момент нульового порядку матриці  $I_{ij}^e$ .

$$m_0 = \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}^e. \quad (3)$$

Момент нульового порядку  $m_0$  [9] з точністю до множника  $\mu$  є основним діагностичним параметром узагальнюючої матриці і визначає сумарну кількість небезпечних об'єктів у секторіальній області  $Q$  робочого простору.

Моменти першого порядку розподілу інтенсивності узагальнюючої матриці визначаються відносно осей секторіальній області  $Q$  робочого простору і обчислюються згідно формул:

$$\begin{aligned} m_{x1} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}^e \times \mu \times \Delta y \times \left( i - \frac{1}{2} \right), \\ m_{y1} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}^e \times \mu \times \Delta x \times \left( j - \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Визначаються моменти більш високих порядків:

$$\begin{aligned} m_{x\nu} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^\nu I_{ij}^e \mu, \\ m_{y\nu} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_j^\nu I_{ij}^e \mu, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\nu$  - порядок моменту.

Змішані моменти включають добутки компонент узагальнюючої матриці різних степенів:

$$\begin{aligned} m_{xy\nu1} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^{\nu-1} x_j I_{ij}^e \mu, \\ m_{xy\nu2} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^{\nu-2} x_j^2 I_{ij}^e \mu, \\ m_{xy(\nu-1)} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i x_j^{(\nu-1)} I_{ij}^e \mu. \end{aligned} \quad (6)$$

На основі аналізу узагальнюючої матриці із застосуванням моментів різного порядку системою штучного інтелекту проводиться інтегральна оцінка матриці шляхом її обробки методами гіперспектрального аналізу на основі застосування двовимірних рядів Фур'є.

Для цього одержана в результаті згортки просторової тривимірної матриці узагальнююча матриця корегується для приведення до квазіперіодичного виду введенням форм-фактору і згладжується кубічними сплайнами. Одержана функціональна залежність  $z_s(x, y)$  подається у вигляді розкладу в кратний (двовірний) ряд Фур'є виду:

$$z(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_{km} e^{j(k\omega_x x + m\omega_y y)} \quad (7)$$

де  $\omega_x = \frac{2\pi}{T_x}$ ,  $\omega_y = \frac{2\pi}{T_y}$ ,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $T_x, T_y$  - періоди, відповідні ортогональним

напрямам секторіальної області  $Q$  відповідно.

Коефіцієнти ряду є комплексними числами, які визначено залежністю:

$$C_{km} = \frac{1}{T_x T_y} \int_{-\frac{T_x}{2}}^{\frac{T_x}{2}} \int_{-\frac{T_y}{2}}^{\frac{T_y}{2}} z_s(x, y) \cdot e^{j(k\omega_x x + m\omega_y y)} \quad (8)$$

В результаті обчислення інтегралів знаходяться комплексні коефіцієнти ряду Фур'є.

З використанням комплексних коефіцієнтів централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту здійснює гіперспектральний аналіз узагальнюючої матриці, в якій зосереджена інформація про наявність та розташування небезпечних об'єктів в межах секторіальної області  $Q$  місцевості. Гіперспектр узагальнюючої матриці порівнюється із набором еталонних спектрів, наявних в базі даних централізованої платформи управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту.

Системою штучного інтелекту проводиться аналіз просторової матриці на предмет відповідності її складових попереднім гіпотезам про наявність на місцевості небезпечних об'єктів. Гіпотези уточнюються з використанням методів теорії нечітких множин. На основі уточнених гіпотез проводиться фільтрація та впорядкування просторової матриці. Аналізуються її окремі блоки та зрізи, проводиться розгортання окремих блоків із виділенням характерних векторів та встановлення їх розташування та конфігурації. Вони служать для сегментації сцени та розуміння сюжету. Здійснюється прив'язка до місцевості (точки верифікації). Важливими задачами централізованої платформи управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту є розпізнавання зображень, виявлення та ідентифікація характерних небезпечних об'єктів. Розпізнавання образів здійснюється шляхом кластеризації окремих блоків та зрізів просторової матриці за допомогою штучних нейронних мереж. В результаті навчання мережі знаходяться центри кластерів, що відповідають окремим групам

небезпечних об'єктів. Вони утворюють кластерну модель наявності на місцевості небезпечних об'єктів таких як міни і боєприпаси.

Для цього використано штучні нейронні мережі у вигляді карт, які самоорганізуються [6]. Дані нейронні мережі можна розглядати як удосконалену модифікацію шару конкуруючих нейронів (шару Кохонена) [7]. Карти, які самоорганізуються виявляють в процесі навчання центри кластерів вхідних масивів даних. В процесі навчання штучної нейронної мережі визначаються вагові коефіцієнти в окремих синапсичних блоках нейрона. У використаній для кластерного аналізу нейронній мережі нейрони знаходяться у вузлах гексагональної решітки. Для створення нейронної мережі використано 30 нейронів, які розташовані у вигляді гексагональної решітки розмірністю  $5 \times 6 = 30$ . Решітка має 5 шарів нейронів по 6 нейронів у кожному. Для навчання нейронної мережі використана стандартна ітераційна процедура [6] (рис. 2, а). Проведено навчання нейронної мережі при числі ітерацій 1000. Після досягнення даної кількості ітерацій процес навчання мережі вважається завершеним. На друк виводиться інформація про групи «конкуруючих» нейронів (рис. 2, б).

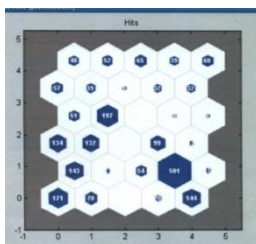
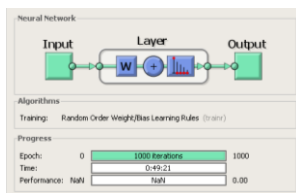


Рис. 2. Графічний супровід процесу навчання штучної нейронної мережі (а) та графічна інтерпретація ступені активності окремих нейронів, яка має місце в кінці навчання мережі (б).

Кластеризація окремих блоків та зрізів просторової матриці дає можливість встановити наявність на місцевості небезпечних об'єктів, таких як міни і боєприпаси.

Запропоновані основні положення технології розмінування на базі штучного інтелекту будуть розвинені і уточнені в процесі подальших досліджень.

### **Література:**

1. Marques, L., Almeida, A. T. de, Armada, M., Fernández, R., Franceschi, H. M., González, P. D., & Baudoin, Y. (2016). State of the Art Review on Mobile Robots and Manipulators for Humanitarian Demining. <http://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/2401>
2. Кириленко В.А. Глобальна проблема розмінування: стан та підходи до розв'язання / В.А. Кириленко, В.Р. Нероба //Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського. 2019, №2(66) - С. 115-119. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/115-119>
3. Попов М.О. Технологія дистанційного виявлення мін на основі аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів: стан та перспективи: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 6 квітня 2022 року. Вісник НАН України. 2022, №5 - С 56–62. <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.056>
4. Swett, B.A., Hahn, E.N., Llorens, A.J. (2021). Designing Robots for the Battlefield: State of the Art. In: von Braun, J., S. Archer, M., Reichberg, G.M., Sánchez Sorondo, M. (eds) Robotics, AI, and Humanity. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6_11)
5. Молочко С.М. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БпАК / С.М. Молочко, В.Г. Башинський, О.Г. Каламурза, В.А. Журахов //Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 2(8) – С. 80-90. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/102>
6. Киричок П.О. Спеціальні методи наукових досліджень /П.О. Киричок, С.В. Струтинський, В.Г. Олійник; НТУУ «КПІ». – Київ: АртЕк, 2016. – 594 с. ISBN 978-617-7264-28-5
7. Miljković, Z., Mitic, M., Lazarevic, M.P., & Babic, B.R. (2013). Neural network Reinforcement Learning for visual control of robot manipulators. Expert Syst. Appl., 40, 1721-1736. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.010>

УДК 621.91.01

**Н.О. Балицька**, к.т.н, доцент,  
**О.О. Томашевський**, аспірант,

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **МЕХАНІЗМ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ**

Мікрофрезерування – це широко використовувана технологія точного виробництва тривимірних мініатюрних компонентів годинників та ювелірних виробів, імплантів, мікрохірургічного обладнання, вимірювальних приладів, деталей мікромашин, інструментів, оптичних виробів, деталей двигунів внутрішнього згорання, космічних апаратів тощо. Можливість обробки широкого діапазону матеріалів, вища якість обробки та швидкість зняття матеріалу є його головною перевагою перед іншими технологіями мікробробництва.

Оскільки процес мікрофрезерування був розроблений на базі процесу звичайного фрезерування, вони мають багато спільних характеристик, однак принципово відрізняються механізмом стружкоутворення. На відміну від традиційного фрезерування, при мікрофрезеруванні одночасно має місце, як зсув, так і пластичне деформування оброблюваного матеріалу. Внесок кожного зазначеного механізму залежить від таких факторів, як товщина зрізу, масштабний ефект, геометричні похибки положення інструменту та стабільність процесу різання. Ці фактори можуть мати взаємозалежний комплексний характер, що призводить до більш складних ефектів під час мікрофрезерування.

На механізм видалення стружки при мікрообробці впливає ефект мінімальної товщини зрізу. Його причиною є від'ємний кінематичний передній кут різального інструменту, спричинений відносно високим радіусом різальної кромки порівняно із товщиною зрізу. Передня поверхня з від'ємним ефективним переднім кутом стискає верхню частину оброблюваного матеріалу, і тому він пластично деформується без різання [1]. Автори роботи [3] запропонували метод визначення мінімальної товщини зрізу шляхом аналізу сигналу сил різання при мікрофрезеруванні із одночасним врахуванням впливу радіального биття інструменту. За допомогою емпіричної моделі процесу мікрофрезерування сталей, розробленої в [4], можна досить точно оцінити мінімальну товщину зрізуваного шару.

При мікрофрезеруванні пазів, в момент, коли інструмент входить в зону обробки, товщина зрізу дорівнює нулю і стружка не утворюється до тих пір, поки інструмент не повернеться до значення переднього кута. Коли товщина зрізуваного шару стане рівною мінімально необхідному значенню, лише тоді почнеться зрізання матеріалу [5]. При фрезеруванні мікропазів менші значення подачі на зуб вимагають більших значень переднього кута для досягнення мінімальної товщини зрізу. В результаті при меншій подачі більша кількість матеріалу стикається з ефектом пластичного деформування та спостерігається



більше пружне відновлення оброблюваного шару після проходження інструменту, а це збільшує питоме зусилля різання.

Окрім ефекту мінімальної товщини зрізу, процес мікрообробки характеризується масштабним ефектом. Масштабний ефект – це відхилення характеристик процесу від екстрапольованих значень, які виникають при зміні розмірів заготовки, інструменту та/або параметрів процесу обробки. Масштабний ефект значною мірою пояснює варіації сил різання, товщини зрізу і утворення задирок на мікрорівні. Масштабним ефектом при мікрорізанні називають залежність питомої сили різання від співвідношення товщини зрізу до радіуса округлення різальної кромки інструменту. Низькі значення масштабного коефіцієнта характеризуються високими питомими силами різання. Коли подача на зуб зменшується і стає меншою за радіус округлення різальної кромки інструмента, спостерігається нелінійне зростання питомої сили різання. Це підтверджує спостереження про пластичну та пружну деформації, коли товщина зрізуваного шару стає меншою за радіус різальної кромки [2].

Таким чином, характер процесу стружкоутворення залежить від багатьох факторів, які спричиняють комплексну дію. Дослідження впливу цих факторів на ефективність процесу стружкоутворення є важливою науково-технічною задачею, яка потребує вирішення.

### Література:

1. Balázs, B.Z., Geier, N., Takács, M. et al. (2020). A review on micro-milling: recent advances and future trends, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 112, pp. 655–684.
2. Aramcharoen, A., Mativenga, P.T. (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 402–407.
3. Dib M, H.M. et al. (2018). Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling, *Precision Engineering*, Vol. 51, pp. 244–262.
4. Gao, S. et al. (2016). Research on specific cutting energy and parameter optimization in micro-milling of heat-resistant stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 1–4, pp. 191–205.
5. Weule, H., Hüntrup, V., Tritschler, H. (2001). Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization, *CIRP Annals*, Vol. 50, No. 1, pp. 61–64.

УДК 621.914.22

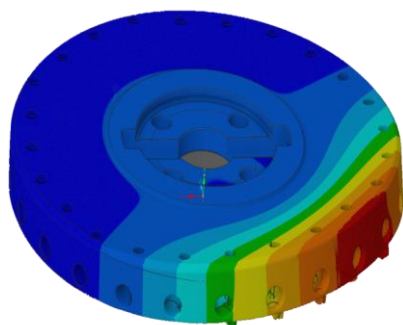
**Г.М. Виговський**, к.т.н., професор,  
**М.М. Плисак**, аспірант,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТОРЦЕВОЇ СТУПІНЧАСТОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ**

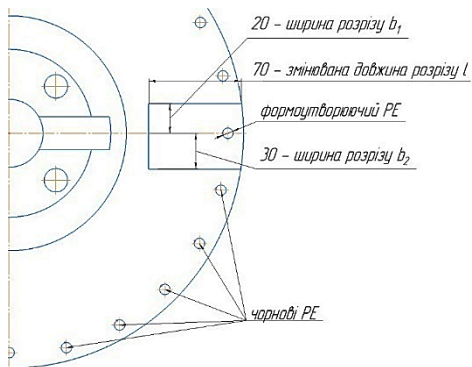
Підвищення точності металообробки є одним із найактуальніших питань у технології машинобудування та автоматизації виробництва і одним із пріоритетних напрямків діяльності машинобудівного виробництва. Крім того, збільшення продуктивності технологічних процесів та якості продукції для сучасного виробництва є одним із складних завдань, вирішення якого передбачає розгляд комплексу питань [1,2].

Процес торцевого фрезерування являє собою складну сукупність явищ, обумовлених великою кількістю чинників. Більшість з них може змінюватися у часі, але навіть зміна хоча б одного чинника, як правило, призводить до нестационарності всього процесу механічної обробки, що істотно ускладнює як його аналіз, так і управління процесом пошуку оптимальних умов його практичної реалізації [3]. Зазвичай на фінішних операціях торцевого фрезерування нехтували похибками обробки, які виникають внаслідок дій сил різання, проте рядом досліджень було встановлено, що під час фінішної обробки ступінчастими торцевими фрезами виникають значні пружні деформації інструмента, що веде до коливання положення формоутворюючого різального елемента (РЕ) відносно поверхні заготовки та погіршення точності обробки [4-8]. Краще розуміння процесу впливу сил різання на різальний інструмент, надає можливість стабілізації процесу торцевого фрезерування шляхом зміни конструкції інструменту. Управління характером протікання фізичних процесів торцевого фрезерування надає змогу послаблення негативної ролі нестационарності процесу різання, що створює передумови для створення принципово нових інструментів.

На основі аналізу опублікованих робіт, досліджувався процес пружної деформації корпусу торцевої ступінчастої фрези діаметром 360 мм під час фрезерування сірого чавуну СЧ21 (170НВ) [9]. В результаті проведених досліджень було встановлено, що складова сили різання  $P_{\gamma}$ , яка виникає на чорнових РЕ, призводить до пружних деформації корпусу фрези, як наслідок відбувається осьове переміщення формоутворюючого РЕ від поверхні заготовки – це призводить до погіршення точності обробки та відхилення від площинності (рис. 1, а). Для забезпечення стабільного положення формоутворюючого РЕ було вирішено відокремити його від чорнових РЕ шляхом розрізання корпусу дисковою фрезою та створення відокремленого пружного сектору для формоутворюючого РЕ (рис. 1, б).



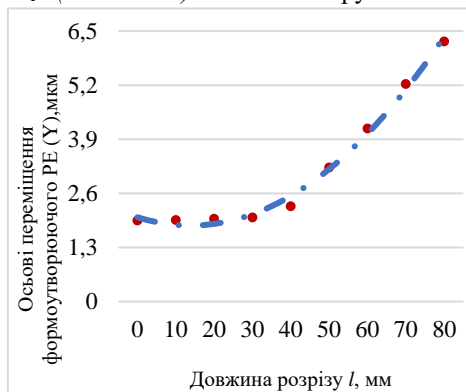
а)



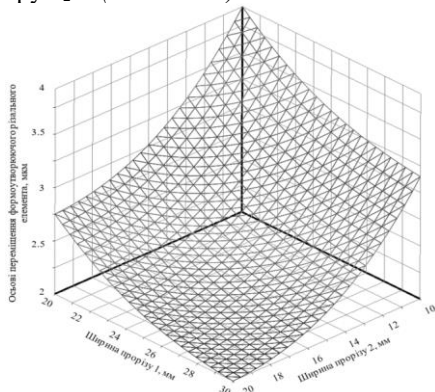
б)

Рис. 1. Торцева ступінчаста фреза: а) пружні деформації корпусу фрези; б) пружний сектор формуючого РЕ

Для цього потрібно розглянути: відстань, на яку відокремити формуючий РЕ (рис. 1), та ширину розрізу  $b_1$  і  $b_2$  бо від розмірів буде залежати жорсткість сектору (рис. 1). Отже, змінними оптимізаційного дослідження були обрані наступні параметри: значення відстані розташування розрізу – діапазон зміни  $l = 0...70$  мм; значення частини пружного сектору  $b_1 = (10...20$  мм) та частини пружного сектору  $b_2 = (20...30$  мм).



а)



б)

Рис. 2. Відокремлення формуючого РЕ від чорнових: а) вплив відстані розрізу  $l$  на осьові переміщення формуючого РЕ; б) ширина розрізу  $b_1$  та  $b_2$

Отримані результати осьових переміщень формуючого РЕ після відокремлення та зміни геометричних параметрів відокремленого сектору показують, що ширина розрізу  $b_1$  та  $b_2$  повинна бути максимального розміру, оскільки зменшення  $b_1$  та  $b_2$  призводить до збільшення осьових переміщень формуючого РЕ через зменшення жорсткості відокремленого сектора

(рис. 2, б). Збільшення радіальної відстані розрізу, призводить до збільшення осьових переміщень формоутворюючого РЕ відносно поверхні заготовки, де мінімальні значення становлять 1,95 мкм, а максимальні значення 6,3 мкм (рис. 2, а). Це пов'язано зі зменшенням жорсткості відокремленого сектору через збільшення його довжини.

Створення відокремленого пружного сектору в корпусі торцевої ступінчастої фрези дозволить забезпечити стабільне положення формоутворюючого РЕ відносно поверхні заготовки, а також зменшити вплив сил різання  $P_{\gamma}$ , які виникають на чорнових РЕ на осьові переміщення формоутворюючого РЕ. Стабільне положення формоутворюючого РЕ буде реалізовано шляхом розробки нової конструкції торцевої ступінчастої фрези з додатковим натискним елементом, який діє на пружний сектор, в якому розміщений формоутворюючий РЕ.

### **Література:**

1. Виговський Г.М. Сучасні тенденції розвитку обробки матеріалів різанням. Процеси механічної обробки в машинобудуванні // Вісник ЖДТУ. 2010. №2 (9). 1-6 с.
2. Виговський Г.М., Громовий О.А., Білявський М.Л. Розширення області використання торцевих фрез, оснащених НТМ. Процеси механічної обробки в машинобудуванні.–2007.–Вип 2 (2007).
3. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь: автореф докт. техн. наук / Петро Петрович Мельничук. – К.: НТУУ “КПІ”, 2002. – 26 с.
4. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь: автореф. дис. ... к.т.н. : 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Г.М. Виговський. – К., 2000. – 16 с.
5. Виговський Г.М. Процес різання торцевими ступінчастими фрезами з косокутною геометрією різальних частин, що оснащені надтвердими матеріалами / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 7. – С. 73–81.
6. А. І. Ісаєв. Чистова обробка площин великогабаритних деталей / А.І. Ісаєв, В. Є. Койре, З. Н. Зубовська. – Київ:1962
7. Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Sanchez, J.A., Salgado, M.A, Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 24 (2004) 621-631.
8. Громовий, О.А. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням / О.А. Громовий, Г.М. Виговський, Н.О. Балицька // Технічна інженерія. – 2020. – № 2(86). – С. 48 – 53.
9. Виговський Г.М. Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин / Г.М. Виговський, М.М. Плисак // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 53–58. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.

УДК 631.171.075.3

**Я.П. Коваленко**, аспірант,<sup>1</sup>  
**М.П. Мазур**, д.т.н., професор,<sup>2</sup>  
**П.П. Мельничук**, д.т.н., професор,<sup>1</sup>  
**Р.С. Турманідзе**, д.т.н., професор,<sup>3</sup>  
*Державний університет «Житомирська політехніка»<sup>1</sup>*  
*Хмельницький національний університет<sup>2</sup>*  
*Грузинський технічний університет (м. Тбілісі – Грузія)<sup>3</sup>*

## **ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ РІЗАННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

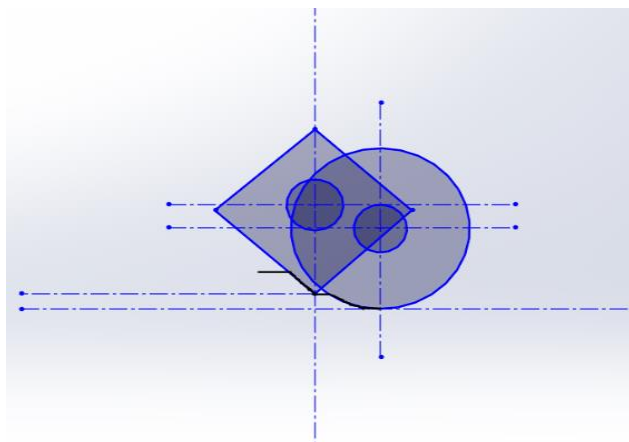
Загартовані сталі належать до важкооброблюваних матеріалів, тому при їх обробці виникають високі динамічні навантаження на ріжучий інструмент, що збільшує тепловиділення в зоні різання та призводить до його руйнування. У зв'язку з цими явищами, вибору інструментальних матеріалів приділяється велика кількість уваги. Для покращення якості поверхні деталей машин, та для забезпечення підвищеної продуктивності їх фінішної обробки застосовують торцеві фрези, що оснащують пластинами різних форм та матеріалів. Дослідженнями вітчизняних та зарубіжних науковців встановлено, що для чистової обробки загартованих сталей найбільш ефективним є застосування інструменту із полікристалічних надтвердих матеріалів та твердосплавних сплавів з різними покриттями [1, 2].

При чистовому торцевому фрезеруванні отримання плоских поверхонь залежить від багатьох параметрів, а саме: схеми фрезерування, режимів різання, геометрії різальних кромок пластин.

Схема різання є одним із важливіших факторів, що впливає на продуктивність процесів обробки, на потужність і силу різання, на собівартість інструмента. Для торцевих фрез використовують схеми різання з різним взаємним розташуванням ножів, що вимагає нових конструкційних рішень для забезпечення якості поверхонь оброблюваних деталей [3].

Перспективним напрямком з удосконалення схеми фрезерування є використання пластин призматичної та круглої форм, що закріплені на торці фрези, та розташовані на 40° одна від одної на відповідних діаметрах.

Торцева фреза складається з 5 призматичних та з 5 круглих пластин (Рис. 1). Чистова обробка (кругла пластина) – глибина  $t = 0,15-20$  мм; напівчистова (призматична пластина) – глибина  $t = 1,5-2$  мм.



*Рис. 1. Комбінована схема різання з круглими та призматичними пластинами*

Запропонована конструкція чистової торцевої фрези з комбінованою схемою різання дозволить:

1. Реалізовувати процес різання зі зрізанням основної частини припуску напівчистовими та чистовими різальними ножами, які закріплені нерухомо в корпусі фрези;

2. За рахунок встановлення круглих та призматичних пластин на відповідних діаметрів на торці фрези дає змогу поєднати чистові та напівчистові операції за один прохід;

3. Використовувати в якості матеріалу ріжучих пластин полікристалічні надтверді матеріали та тврдосплавні сплави з покриттями, що дозволить значно підвищити продуктивність обробки.

### **Література:**

1. Клименко С.А. Механічна обробка інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи. [Електронний ресурс]. Режим доступу : [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020\\_Matters\\_TextOnline.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf)

2. Faga, M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2010. P. 133–136.

3. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новосьолов Ю.К., Якубов Ф.Я. Основи теорії різання матеріалів. Львів: Новий світ-2000, 2011. С.205.

УДК 621

**О.А. Шишкова**, аспірантка,  
**О.А. Громовий**, к.т.н., доцент,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТОМ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ**

Деталі із загартованих сталей важко оброблюються і є трудомісткими в машинобудуванні. Висока твердість матеріалу деталі ставить додаткові вимоги до різального інструменту та вибору режимів різання.

Матеріал різальної частини інструменту, який буде обробляти загартовану сталь, повинен мати хорошу стійкість до пластичної деформації, хімічну стійкість при сильному нагріванні, механічну міцність, зносостійкість.

Для точіння сталі високої твердості розглянемо три варіанти обробки різанням: універсальними токарними пластинами з твердих сплавів, керамічними пластинами та пластинами на основі кубічного нітриду бору (cubic boron nitride (CBN)).

Пластини з твердих сплавів є економічним варіантом, вони стійкі до абразивного зносу і здійснюють обробку загартованих сталей твердістю до 55 HRC<sub>c</sub>. При більш високій твердості матеріалу стійкість такого інструменту буде недостатньою.

Керамічні пластини є більш прийнятними для точіння деталей із загартованих сталей. В основному, їх виготовляють зі змішаної кераміки або кераміки, армованої ниткоподібними кристалами. Керамічні пластини мають високу зносостійкість, низьку теплопровідність, стабільність при високих температурах і високий рівень твердості. Ними здійснюють обробку загартованої сталі твердістю від 45 до 60 HRC<sub>c</sub>.

На сьогоднішній день обробку сталених загартованих деталей виконують інструментом з синтетичних надтвердих інструментальних матеріалів, зокрема, на основі нітриду бору. Їх недоліком є значна вартість, яка в декілька разів перевищує ціну на керамічні пластини.

При токарній та фрезерній обробці, через високу твердість загартованої сталі, саме їм доводиться віддавати перевагу – інші інструментальні матеріали у таких випадках часто виявляються непрацездатними.

Зношування інструменту відбувається внаслідок хімічної взаємодії, яка, до того ж, термічно активується на контактних ділянках – чим вищий об'ємний вміст нітриду бору у композиті, тим більша швидкість його зношування в умовах безперервного точіння, особливо, при високих швидкостях різання [1]. Проте, при обробці загартованої сталі не відбувається окислення, що забезпечує різальну здатність інструментів із пластин на основі кубічного нітриду бору. Необхідною умовою для токарної обробки загартованих сталей є інструмент з низьким коефіцієнтом тертя, що вирізняється достатнім рівнем теплопровідності.

Точіння загартованих сталей з необхідною продуктивністю та якістю виконують інструментом, оснащеним полікристалічними надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору. Використання такого інструменту дозволяє при обробці загартованих сталей у 5...10 разів збільшити швидкість різання порівняно з твердосплавними різцями [2].

Часто деталі із загартованої сталі високої твердості (до 65 HRC<sub>c</sub>) на заключних (фінішних) токарних операціях обробляють саме пластинами на основі CBN. Це є вдалою заміною шліфування, що економить витрати і час обробки, підвищує якість продукції. При точінні загартованої сталі інструментами на основі CBN зазвичай використовується сухе різання або різання з охолодженням повітрям. Якщо необхідно застосовувати мастильно-охолоджувальну рідину, її слід вибирати рідину на водній основі, з подачею в зону різання безперервним потоком.

При різанні важкооброблюваних сталей та сплавів основною проблемою є необхідність подальшої інтенсифікації режимів обробки, а саме збільшення швидкості різання. На даний час розроблені та знайшли застосування у найбільш сучасних технологіях механічної обробки два типи надтвердих композитів: з високим ВН (>80 %) та низьким ВЛ (45–75%) вмістом надтвердої фракції із зерен CBN та зв'язкою на основі нітридів та карбідів тугоплавких металів.

Однією з причин широкого впровадження лезової обробки загартованих сталей інструментом на основі кубічного нітриду бору є особливість зносостійкості цього інструменту. Висока зносостійкість працездатність різців з нітриду твердого бору реалізується в вузькому діапазоні швидкостей різання.

З огляду на вищенаведене, дослідження впливу геометрії різального інструмента, режимів обробки деталей із загартованих сталей інструментом на основі кубічного нітриду бору є актуальним і потребує подальшого вивчення.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Чумак А.О. Підвищення стійкості інструментів з надтвердих композитів кубічного нітриду бору групи ВЛ при фінішній лезовій обробці загартованих сталей: дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 - Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Чумак Анатолій Олександрович : захищена 2022-12-08; . - 232 с.

2. Експериментальні дослідження ефективності інструментів оснащених новими типами композитів з КНБ / С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, Ю.О. Мельничук та ін. // Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю, 5–6 листопада. – Житомир, 2021.



УДК 621.9.02

**С.І. Радкевич**, аспірант,  
**Н.В. Обурко**, студент 2 курсу,  
**Л.Є. Глембоцька**, к.т.н., доцент,  
**П.П. Мельничук**, д.т.н., професор,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ОБРОБКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ЧАВУНІВ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ БАГАТОЛЕЗОВИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ**

В сучасній техніці застосовують сплави заліза з вуглецем. Весь комплекс властивостей сплаву залежить від його кількості та форми. Близько 95% усієї металевої продукції припадає на частку залізних сплавів. До їх складу зокрема входять і чавуни. Протягом останніх двох десятиліть вони стали більш досконалими, і виробники чавунів далі продовжують вдосконалювати технології їх виготовлення. Проте, при виборі підходящого інструменту для обробки плоских поверхонь деталей з чавунів є кілька змінних параметрів і проблем, які слід враховувати при виборі інструментального матеріалу. Існує велика кількість різних типів чавунів, і вони мають різний рівень міцності, оброблюваності та вартості. Крім того, кожен з цих типів також має кілька марок, механічні властивості яких істотно відрізняються (значення границі міцності  $\sigma_B$  може бути в межах від 100МПа до 1000МПа). Особливою популярністю нині користуються чавуни з вермикулярним графітом ЧВГ, також відомі як чавуни з ущільненим графітом, які у порівнянні з сірими чавунами мають більшу міцність і значно меншу вагу (границя міцності  $\sigma_B$  до 550 МПа, відносне подовження –  $\delta$  до 2 %, твердість до 241 НВ, ударна в'язкість КС – до 15 Дж/см.). Вони використовуються для деталей, що піддаються як механічним, так і термічним навантаженням. Але поряд з перевагами, вони мають один вагомий недолік – значно нижчу оброблюваність.

Основна роль різального інструмента полягає в зрізанні стружки, а відсутність MnS в складі ЧВГ та вермикулярна форма графітових включень є тими причинами, які ускладнюють цей процес. В процесі обробки ЧВГ в зоні різання виникають високі температури і сили, інструмент нагрівається та відчуває механічні навантаження і контактне тертя з оброблюваним матеріалом. Різальний інструмент працює в важких умовах, а від ефективності його роботи в першу чергу і залежать надійність та якість обробки. Для забезпечення ефективної обробки інструментальні матеріали повинні мати високі значення допустимих напружень на згин, удар, кручення. Твердість різальної частини інструменту повинна бути в 1,5 -2 рази вище твердості оброблюваного матеріалу, забезпечувати його ріжучі властивості та не втрачатися при високих температурах, і працювати з великими швидкостями різання. Крім того, при виборі інструментального матеріалу потрібно враховувати особливості металургії чавуну (в процесі лиття мікроструктура

поверхні деталі відрізняється від її внутрішнього вмісту). Потрібно враховувати також і наявність піщаних включень та раковин в них. Промисловість випускає інструментальні матеріали які застосовуються для обробки чавунів, це: тверді сплави; мінералокераміка та надтверді інструментальні матеріали на основі кубічного нітриду бору (КНБ). Серед перерахованих матеріалів КНБ має найбільші значення твердості – він є другим за твердістю матеріалом після алмазу, має робочу температуру до 1250°C, характеризуються високим опором до термічних ударів та циклічних навантажень, та має слабку хімічну взаємодією із залізом.

Велика кількість зарубіжних та вітчизняних дослідників та науковців займаються пошуком методів підвищення ефективності обробки чавунів з вермикулярним графітом. Одним з питань якому вони приділяють багато уваги, є пошук інструментального матеріалу, застосування якого дозволяло б досягнути найкращих показників оброблюваності, якості отриманої поверхні та було б економічного вигідним у використанні. В ряді робіт дослідники порівнювали оброблюваність ЧВГ з сірими чавунами інструментами з твердосплавних матеріалів з покриттям та без, з мінералокераміки та з надтвердих матеріалів на основі КНБ. В більшості робіт зазначається що КНБ має великі переваги по відношенню до твердосплавних матеріалів та кераміки. Але вони більш стосуються обробки сірих чавунів при високошвидкісній обробці (800 м/хв), по відношенню до ЧВГ ці переваги незначні. В одній з робіт автори повідомили, що при різанні ЧВГ інструментом з КНБ, було виявлено високий дифузійний знос у вигляді глибокого кратера. На їх думку це сталося через спорідненість пластини з КНБ до матеріалу заготовки. Реальні ж механізми, що стоять за високим дифузійним ефектом при обробці CGI з використанням CBN ще не з'ясовані, і потребують вивчення. Інші дослідження показали, що використання мінералокераміки в якості інструментального матеріалу для обробки ЧВГ також мають переваги, даючи кращу якість обробленої поверхні та стійкість інструменту, по відношенню до твердосплавних матеріалів, але з економічної точки зору вони є абсолютно не вигідними. В декількох роботах дослідники порівнювали оброблюваність СЧ з ЧВГ використовуючи твердосплавні матеріали з різними типами захисних покриттів, і повідомили що нанесення покриттів значно збільшує ресурс різального інструмента, і може бути ефективним рішенням для підвищення оброблюваності ЧВГ. Такої ж думки притримуються виробники різальних інструментів, і розширюють лінійку інструментів з твердосплавних матеріалів з нанесеними покриттями на них (CVD TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), заявляючи що вони підходять для усіх груп оброблюваних матеріалів.

Для пошуку ефективного рішення при виборі інструментального матеріалу для обробки ЧВГ, плануємо дослідити оброблюваність плоских поверхонь деталей з ЧВГ багатолезовим інструментом зі змінними пластинами з твердосплавних матеріалів з нанесенням покриттів, з мінералокераміки та з надтвердих матеріалів на основі КНБ з нанесенням покриттів та без.

УДК 621.9.2

**І.А. Бойко**, к.т.н., інж.<sup>1,2</sup>,

**В.Л. Карнаух**, інж.<sup>1</sup>,

**В.В. Юр'єва**, інж.<sup>1</sup>,

*АТ Мотор Січ, м. Запоріжжя, Україна<sup>1</sup>,*

*Національний університет «Запорізька політехніка»<sup>2</sup>*

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМОГ ДО МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ В ПРОЦЕСІ МОДЕРНІЗАЦІЇ**

У ринкових умовах важливого значення набуває випуск конкурентоспроможної продукції, що досягається високою якістю продукції, нижчою собівартістю її випуску, ніж у конкурентів. Досягнення цих показників значною мірою пов'язане з технологічним обладнанням, що використовується для випуску продукції.

На сьогодні в промисловості склалася ситуація, коли обладнання, яке використовується, морально та фізично застаріло, а закупівля нового потребує значних капіталовкладень. Експлуатація та ремонт унаслідок фізичного зношування та відсутності запасних частин стають дорожчими. Переважно обладнання не відповідає технічним вимогам з причин зношування механічних та гідравлічних вузлів, а також електричної та електронної частин: електродвигунів, приводів і систем управління.

Практика машинобудування вказує на те, що раціональна побудова (компоновка) верстата має великий вплив на його якість та точність. Доцільний вибір компоновки, пропорцій, розташування вузлів забезпечують необхідну спрямованість та спеціалізацію верстата, його відповідність певним технологічним та іншим вимогам, високі техніко-економічні показники якості.

Усебічний перехід на агрегатно-модульний принцип побудови верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) дає змогу виготовляти принципове нове сучасне технологічне обладнання або виконувати його часткову модернізацію, зокрема заміну певних вузлів (модулів), для розширення технологічних можливостей верстата в цілому. Такого роду модернізація проводиться з мінімальною затримкою виробничого циклу та має мінімальний вплив на номенклатуру продукції, що випускається.

Найчастіше на підприємстві з різних причин є обладнання, задіяне у виробництві не на повну потужність (з коефіцієнтом використання менше 0,3–0,5). Дати такому обладнанню «друге життя» можливо проведенням модернізації за такими напрямками:

- заміною окремих систем (гідравлічної, системи управління та ін.);
- розширенням вихідних функціональних можливостей (уведенням додаткової лінійної, налагоджувальної або кругової осі);
- комплексною заміною елементної бази всіх систем верстата з одночасним розширенням числа робочих координат, використовуючи основні елементи станини.

Рівень різних обсягів модернізації можливо розглянути на прикладі верстата MA-655A (рис. 1, а), виробництва Савелівського машинобудівного заводу, який успішно пройшов модернізацію на підприємстві АТ «Мотор Січ». Верстат виконаний за вертикально-фрезерною схемою, має 3 програмно-керовані лінійні координати  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ , управління забезпечується системою ЧПК, інструментальний магазин на 8 позицій.

Заміна застарілої системи ЧПК новою українською системою WL-4 дозволила за рахунок мінімальної заміни датчиків та електродвигунів приводу осей скоротити число програмних збоїв застарілої апаратури, підвищити швидкість подачі і точність роботи верстата (рис. 1, б). Крім того, з'явилася можливість до трикоординатної схеми обробки виконати прив'язку додаткової поворотної осі (програмно-поворотні столи розробки і виробництва АТ «Мотор Січ»), що істотно розширило можливості цього верстата (рис. 1, в).

Для забезпечення виконання вимог технічного завдання конструкція верстата, після модернізації, може суттєво відрізнятись від базової. Зокрема, для фрезерування профілю вентиляторних лопаток авіаційних двигунів шпindelний вузол верстата MA-655 A був замінений на високошвидкісний мотор-шпindel фірми Fisher, який розміщується на поворотній силевій голові (рис. 1, г), яка переміщується вздовж осі  $Z$  за допомогою двох КПП. Поворотна силова голова забезпечує обертання шпindelного вузла в межах від  $-50^\circ$  до  $+50^\circ$  від номінального положення, що дозволяє забезпечити необхідний кут нахилу різального інструменту до складнопрофільної поверхні лопатки. Закріплення самої лопатки відбувається у двох, розташованих одна напроти одної, поворотних головах, які здійснюють синхронізоване обертання навколо осі  $X$ , що дозволяє обробити лопатку з обох сторін за одну установку. Для виконання обробки лопаток вентилятора різних типорозмірів одна поворотна голова виконується стаціонарною, а інша – рухомою. Верстат комплектується новими швидкісними лінійними напрямними кочення, системами подачі і очищення ЗОР, системою ЧПК Siemens 840D, новими гідравлічною та пневматичною системами, захисним кабінетом і 16-позиційною системою заміни інструмента на базі робота Fanuk.

Дещо схожа схема використана при модернізації верстата MA-655 A в 5-координатний профіль для обробки негабаритних корпусних деталей авіаційних двигунів, статорних і роторних лопаток, кронштейнів, фітингів тощо. Поруч із плоским встановлюється поворотний стіл (вісь  $C$ ), а обертання шпинделя обмежено від  $0^\circ$  до  $+90^\circ$  (вісь  $B$ ) (рис.1, д). Інструментальний магазин встановлюється з лівої сторони від шпindelного вузла.

За рахунок розширення технологічних можливостей модернізованого обладнання і вдалого підбору компоновки верстата в залежності від поставлених задач застосування нового інструменту при використанні п'ятикоординатної обробки дозволило скоротити час виготовлення деталей у середньому на 50%, а іноді - в декілька разів.

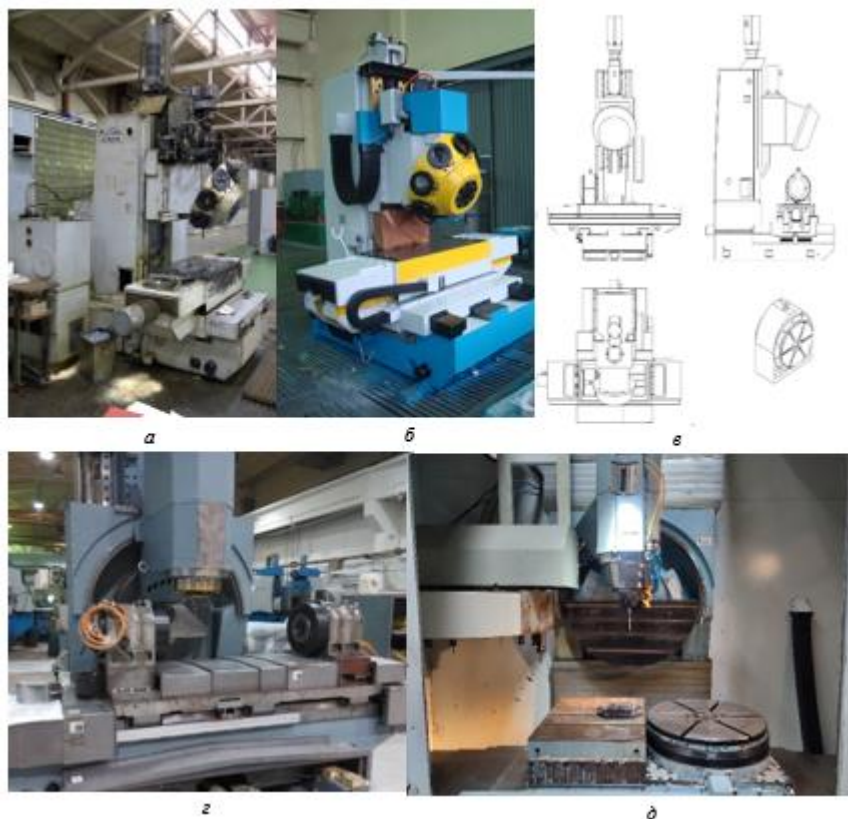


Рис. 1. Варіанти модернізації верстата з ЧПК MA-655 A2:  
а – базове виконання верстата; б – 3-х координатне виконання;  
в – 4-х координатне виконання (встановлення поворотного стола (вісь А);  
г – 5-ти координатне виконання (встановлення поворотних голів (вісь А) і  
обертowego шпиндельного вузла (вісь В)); д – 5-ти координатне виконання  
(встановлення поворотного стола (вісь С) і обертowego шпиндельного вузла  
(вісь В)

### Література:

1. Обладнання для новітніх технологій [Текст]: навч. посібник / В.В. Солоха, Л.Й. Івченко, І.А. Бойко та інші. – Запоріжжя: Мотор Січ, 2021. – 209 с.

УДК 621.81.85

**Л.П. Іванова**, аспірант,<sup>1</sup>  
**П.І. Літовченко**, к.т.н., доцент,<sup>2</sup>  
**В.М. Ночвай**, к.т.н., доцент,<sup>3</sup>  
**Л.Г. Полонський**, д.т.н., професор,<sup>3</sup>  
**М.С. Степанов**, д.т.н., професор,<sup>1</sup>  
*Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»<sup>1</sup>,  
Національна академія Національної гвардії України (м. Харків)<sup>2</sup>,  
Державний університет «Житомирська політехніка»<sup>3</sup>*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН НА ДЕФОРМАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ШЛІФУВАННІ**

Великий вплив на точність оброблюваних деталей при круглому шліфуванні надають температурні процеси, що відбуваються в технологічній системі верстату, а саме: в зоні різання, на поверхнях шліфувальної бабки, в опорах шпинделя, тощо. У круглошліфувальних верстатах використовуються декілька технологічних рідин – мастильно-охолоджуюча (МОР), робоча рідина гідростатичних підшипників шпинделя, робоча рідина в гідросистемі приводу стола. Ці рідини беруть участь у теплообміні і суттєво впливають на тепловий стан технологічної системи, а, отже, і на точність оброблених деталей. У найбільшій мірі це відноситься до МОР, що контактує з найпотужнішим джерелом теплоти у верстаті – зоною різання, а також з базовими елементами верстата.

У даній роботі вирішувалася актуальна наукова задача – розробка наукових, методичних, алгоритмічних і програмних засобів технологічного забезпечення точності обробки шліфуванням за рахунок керування тепловим режимом технологічних рідин, що застосовуються у шліфувальних верстатах.

У ході досліджень виконано аналіз сучасного стану температурного впливу робочих рідин на деформацію елементів шліфувальних верстатів та визначено шляхи зниження теплових деформацій на точність обробки. Встановлено, що на даний час не розроблені математичні моделі теплового режиму підсистеми застосування МОР та не визначено вплив елементів підсистеми на тепловий стан МОР у круглошліфувальних верстатах. Роль робочих рідин у формуванні температурних деформацій круглошліфувальних верстатів детально не досліджувалася.

Не вивчені можливості зниження інтенсивності передачі тепла від МОР до деталей верстата та не встановлено тепловий вплив технологічних рідин шліфувальних верстатів на температурні деформації їхніх деталей і вузлів. Існуюча практика застосування МОР забезпечує ефективну дію безпосередньо у зоні шліфування, однак збільшує рівень температурних деформацій елементів технологічної системи внаслідок контакту нагрітої МОР з деталями та вузлами

верстата. При цьому точно не окреслені зони впливу нагрітої МОР на елементи шліфувальної бабки, стола тощо.

Не досліджені достатньо можливості зниження кількості тепла у МОР при обробці шляхом використання нових технологічних схем шліфування з додатковими проміжними правками (ДПП) круга. Не розроблені рекомендації щодо зменшення теплових деформацій шляхом стабілізації температурного режиму МОР і вдосконалення методів її очистки [1].

На основі проведеного аналізу предметної області розроблена математична модель теплообміну у підсистемі застосування МОР круглошліфувального верстата, що описує температурний режим МОР в резервуарі охолодження верстата в робочому та перепускному режимах. Модель дозволяє оцінити стаціонарну і нестаціонарну температури МОР в резервуарі в залежності від етапів циклу шліфування та розрахувати раціональний об'єм МОР у системі її застосування. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку параметрів теплового режиму системи застосування МОР (свідоцтво № 92215 про реєстрацію авторського права на твір).

В результаті розрахунково-аналітичних досліджень на основі моделі встановлено, що стабілізація теплового режиму МОР у системі її застосування настає після 44...78 хв. роботи шліфувального верстата при об'ємі резервуара 30...750 дм<sup>3</sup> і точності визначення величини усталеної температури 0,50...0,01 °С, що дозволяє використовувати результати досліджень при розробці алгоритмів і засобів компенсації температурних деформацій верстатів при обробці високоточних деталей.

Проаналізовано тепловий вплив повітряних потоків, що створюються рухомими елементами верстата, та розроблено рівняння теплового балансу від дії цих потоків на базові елементи технологічної системи. Встановлено, що найбільший тепловий вплив здійснює робоча рідина підсистеми мащення підшипників шпинделя та МОР, що попадає на зовнішні поверхні шліфувальної бабки. Для зменшення температурних деформацій рекомендовано виключати контакт розігрітої МОР з елементами верстата, температурні деформації яких можуть впливати на точність обробки, що можна забезпечити конструктивно. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку параметрів теплового режиму системи застосування МОР (свідоцтво № 92215 про реєстрацію авторського права на твір).

Для зниження енергонасиченості круглошліфувальних верстатів запропоновано використовувати схему круглого шліфування з ДПП шліфувального круга [3]. Побудована математична модель процесу шліфування з ДПП, яка описує силові і теплові характеристики процесу шліфування та параметри і кількість ДПП. Виконано розрахунково-аналітичні дослідження, за результатами яких встановлено, що застосування схеми шліфування з ДПП дозволяє знизити навантаження елементів технологічної системи і дістатися зниження енергонасиченості процесу шліфування на 25...75 %. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку параметрів шліфування з ДПП (свідоцтво № 98881 про реєстрацію авторського права на твір).

## **Література:**

1. Степанов М.С., Полонський Л.Г., Літовченко П.І., Іванова М.С., Корнієнко В.О. Визначення забрудненості МОР механічними домішками при шліфуванні валків прокатних станів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. / Харків : НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 58–64.
2. Stepanov, M., Ivanova, L., Litovchenko, P., Ivanova, M., Basova, Y. Determination of parameters of cylindrical grinding with additional intermediate dressing. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manuf. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp 33-0340. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_33).

УДК 621.914

**А.В. Голубовський**, аспірант,  
**Я.А. Степчин**, к.т.н., доцент,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРОСТОРОВОЇ ФОРМИ НИЗЬКОЇ ЖОРСТКОСТІ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ**

Проблема підвищення точності фрезерної обробки деталей просторової форми низької жорсткості є актуальною у сучасному машинобудівному виробництві. Нержавіюча сталь використовується в різних галузях, включаючи медичну, харчову, та хімічну промисловість, а також енергетику та аерокосмічну галузь. Проте властивості нержавіючих сталей знижують їх оброблюваність різанням, впливають на стійкість інструментів та якість оброблених деталей [1, 2].

Додатково ускладнює процес різання обмежена жорсткість деталей, що може призводити до зниження точності готових виробів та продуктивності процесу обробки.

З огляду на зростання вимог до якості та точності продукції на світовому ринку, питання оптимізації фрезерної обробки деталей з нержавіючої сталі набуває великої вагомості. Високоякісні деталі є важливими для безпеки, надійності, та довговічності устаткування і машин. Тому вирішення проблеми підвищення точності фрезерної обробки деталей просторової форми низької жорсткості з нержавіючої сталі є важливим науковим завданням і потребує докладного опрацювання.

Розгляд шляхів вирішення окресленої проблеми вимагає систематизації чинників що впливають на кінцеву точність фрезерування нежорстких деталей.



Важливе значення також мають специфічні особливості нержавіючих сталей, які широко застосовуються у харчовій промисловості.

Оброблюваність нержавіючих сталей характеризується певними негативними чинниками, до яких відносяться:

- схильність до зміцнення при деформації, зростання твердості оброблюваної поверхні деталі під впливом пластичної деформації процесу різання;

- низька теплопровідність порівняно з конструкційними сталями, що обумовлює більш високі температури в зоні різання і швидке зношування різального леза інструменту;

- схильність до наростоутворення, що призводить до зміни і нестабільності геометричних параметрів різального леза, і відповідно, погіршення якості оброблюваної поверхні.

- утворення зливної стружки, що погано дробиться з утворенням задирок на обробленій поверхні.

Додатковий негативний вплив на точність обробки просторових деталей має їх обмежена жорсткість, що призводить до збільшення лінійних деформацій деталей і зміни форми і розташування окремих поверхонь.

Заходи спрямовані на підвищення точності обробки фокусуються на зниженні силової складової процесу різання, інтенсифікації відводу тепла та цілеспрямованому управлінні параметрами режиму різання [3]:

- вибір інструментів з оптимальною геометрією та матеріалом різальної частини, спрямованих на зниження сили різання та зменшення вібрацій;

- зниження температури різання забезпеченням ефективного охолодження, що мінімізує теплові деформації деталей та підвищує стійкість інструментів.

- вибір раціональних параметрів режиму та їх регулювання під час обробки з метою забезпечення усталеності процесу різання, підтримання оптимальної швидкості різання для різних типів обробки та різних матеріалів, регулювання швидкості подачі: усе спрямовано на підвищення якісних показників обробки та стійкості інструментів;

- постійний моніторинг обробки з вібраційний аналізом дозволяє виявити ділянки підвищеної віброактивності процесу і вчасно виконувати його корекцію;

- контроль оброблюваних деталей під час та після обробки дозволяє вчасно реагувати на зниження точності процесу виготовлення деталей в партії, викликаних випадковими та систематичними чинниками.

У більшості випадків на машинобудівних підприємствах застосовують фрезерування зі зменшеними глибинами різання, адаптивним управлінням режимами обробки, базування і закріплення нежорстких заготовок з додатковими підвідними опорами тощо.

Співвідношення для визначення коефіцієнта для підвищення точності (коефіцієнт уточнення), тобто відношення однойменних похибок заготовки  $\Delta z$  і деталі  $\Delta d$  має вигляд [3]:

$$\xi = \frac{\Delta z}{\Delta d} = \frac{(t_1 - t_2)}{(y_1 - y_2)} \quad (1)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  – максимальна і мінімальна глибини різання,  $y_1$  і  $y_2$  – відповідні сумарні переміщення в системі по нормалі до поверхні обробки.

Нестабільність сили різання та різні значення жорсткості в різних частинах деталей призводять до нерівномірних пружних деформацій цих елементів під час їх закріплення та обробки. Класифікація просторових деталей залежно від ступеня жорсткості виявляється складною задачею, але важливою для визначення досяжності необхідної точності та площинності обробки. При розробці пристосувань для обробки деталей, таких як кришки, корпуси, і т. д., дотримання правил 6-ти точок базування рекомендується, де важливо враховувати максимально можливу відстань між трьома опорними і двома напрямними точками, а також симетричне розподілення сил затиску. Проте для нежорстких деталей цей принцип непридатний.

В багатьох випадках з достатньою для практики точністю при дослідженні різноманітних технологічних систем як оціночну функцію можна прийняти умови стійкості, що визначають допустимий рівень коливань, запас стійкості і швидкодію технологічних систем. У загальному вигляді така функція, що визначає переміщення технологічної системи під дією імпульсних або ударних навантажень, має вигляд :

$$y_{max} = \sum_1^k y_k \beta_k \leq \Delta, \quad (2)$$

де  $y_{max}$  – найбільше відносне переміщення технологічної системи у напрямку, що визначає точність обробки.;  $y_k$  – найбільше переміщення у вибраному напрямку під дією одного імпульса для  $k$ -ої форми коливань технологічної системи;  $\beta_k$  – коефіцієнти, що враховують вплив повторних імпульсів на переміщення системи;  $\Delta$  – допустимі переміщення, що забезпечують задану точність обробки.

У дослідженні, яке було проведено в [4], розглянуто, як нежорсткі деталі можуть виникати похибки обробки через залишкові напруги, які накопичуються в заготовках та змінюються під час обробки, що може призвести до деформації оброблених деталей. Також зазначено, що при обробці нежорстких деталей сила різання  $P_y$  викликає одночасне стискання обробленої поверхні, що в свою чергу впливає на глибину різання.

В роботі [5] акцентується увага на тому, що однією з основних причин автоколивань нежорстких деталей є періодичні зміни в їх жорсткості щодо нерухомих осей деталей, елементів пристосування, а також складових верстата. Більшість нежорстких деталей, включаючи їх заготовки, мають складну геометричну форму, яка відрізняється від простих плоских деталей, таких як планки, бруски або плити. Розрахунок динамічних характеристик таких деталей, як єдиного цілого, є важким завданням, тому автори рекомендують розбивати кожен деталь на окремі частини, щоб дослідити взаємозв'язки між

їхньою геометрією і параметрами автоколивань, такими як частота ( $W$ ) і амплітуда ( $A$ ).

**Висновки.** Підвищення точності обробки та її оптимізування можливе лише на основі вивченням закономірностей виникнення і зміни похибок обробки, що пов'язані з характеристиками і умовами експлуатації обладнання та інструмента з обов'язковим врахуванням параметрів жорсткості заготовки. Для розв'язання цієї задачі необхідно розробити методологію визначення оптимальних режимів різання, параметрів інструментів та пристосувань, динамічних характеристик і умов функціонування технологічної обробної системи, що гарантують задану точність і продуктивність обробки. Заплановані дослідження передбачають:

- визначення складових і створення узагальненої моделі технологічної системи;
- визначення впливу на технологічну систему у процесі її роботи закономірностей факторів, що змінюються в процесі обробки;
- аналіз впливів цих факторів на відносне переміщення інструмента і заготовки;
- встановлення оптимальних параметрів і умов роботи технологічної системи, що забезпечують дотримання вимог до обробки.

### **Література:**

1. Некрасов С.С. Підвищення працездатності твердосплавних кінцевих фрез при обробці ливарних сталей аустенітного класу. автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Некрасов Сергій Сергійович; НТУУ «КПІ», Київ, 2012 – 23 с.
2. Stephenson, D.A., & Agapiou, J.S. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice* (3rd ed.). CRC Press.
3. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Головатенко О.В. Техніко-технологічні підходи удосконалення процесу торцевого фрезерування плоских поверхонь нежорстких деталей. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки», – 2008. №3 (46). С.139-146.
4. Колот Л.П., Бойко Ю.А. Обробка нежорстких площинних деталей з раціональним зусиллям різання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. пр. – Вип. 18. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 176–179.
5. Калафатова Л.П., Олійник С.Ю. Постановка задачі математичного моделювання процесу фрезерування з врахуванням впливу конструкції деталі на динаміку технологічної системи ВПД // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. пр. – Вип. 18. – Краматорськ: ДДМА, 2005.

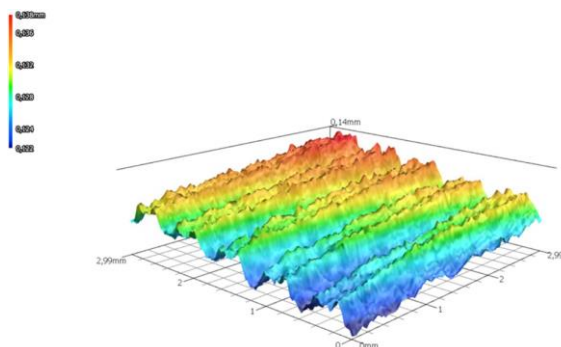
УДК 621.91.01

**Д.С. Бондар**, магістрант,  
**Н.О. Балицька**, к.т.н., доцент,  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ФРЕЗЕРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ АРЕАЛЬНИМ МЕТОДОМ

За останні роки ареальний метод вимірювання шорсткості набуває все більшого поширення, оскільки він дозволяє краще характеризувати структуру механічних поверхонь за допомогою 24 параметрів. Це особливо важливо при аналізі мікрорельєфу виробів із прогресивних матеріалів, наприклад матеріалів з ефектом пам'яті форми.

Дане дослідження було виконано з метою визначення впливу режимів різання на параметри об'єму рельєфоутворювальних мікроформ. Сухе фрезерування зразків із нітінолу (сплав NiTi, Ni 56,5, Ti 43,5 wt%) розміром 30×30 мм проводилося на обробному центрі DMU 80 eVo Deckel Maho. Застосовувалася торцева фреза CoroMill 300 діаметром 44 мм з механічним кріпленням восьми різальних пластин із твердого сплаву марки H13A (без покриття). Режими різання:  $V = 20$  м/хв;  $s_z=0,15$  мм/зуб;  $t = 0,75$  мм; та  $V = 20$  м/хв;  $s_z=0,05$  мм/зуб;  $t = 0,75$  мм. Аналіз параметрів шорсткості поверхні фрезерованих зразків виконано за допомогою оптичного 3D-профілометра KEYENCE серії VR-6000 (рис. 1).



*Рис. 1. 3D-модель шорсткості поверхні  
( $V = 20$  м/хв;  $s_z=0,15$  мм/зуб;  $t = 0,75$  мм)*

Параметри об'єму є інтегральними характеристиками, що відображають співвідношення між величиною западин і пустот рельєфу для піків, западин і ядра аналізованої поверхні у розрахунку на коефіцієнт змінання ареалу. У даному дослідженні пікам належать перші 10 % величини коефіцієнта змінання ареалу (КЗА), до западин належать величини від 80 до 100 %

величини КЗА, а ядру належить діапазон 10...80 % величини КЗА. Для порівняльної оцінки об'ємів піків  $V_{mp}$  та ядер матеріалу  $V_{mc}$  на одиницю площі поверхні, а також об'ємів пустот ядер  $V_{vc}$  та жолобів  $V_{vv}$  рельєфоутворюювальних елементів поверхонь, оброблених при різних значеннях подачі, було виконано оцінку структури поверхонь ареальним методом (ISO 25178-2:2021). Результати вимірювань наведені на рис. 2.

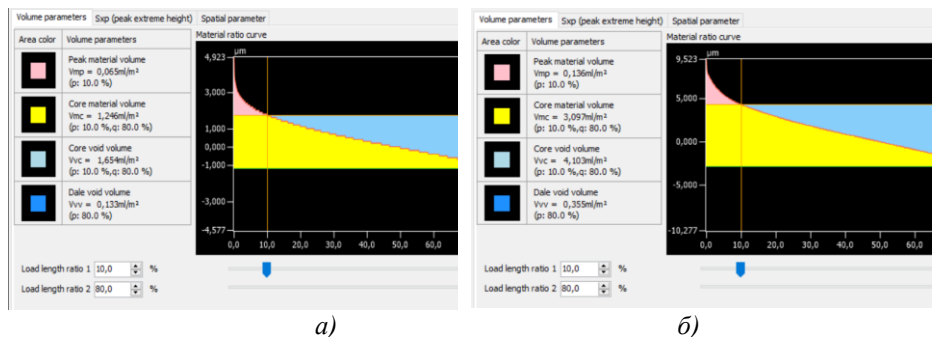


Рис. 2. Об'єм матеріалу і пустот:

а)  $V = 20$  м/хв,  $s_z = 0,05$  мм/зуб,  $t = 0,75$  мм;

б)  $V = 20$  м/хв,  $s_z = 0,15$  мм/зуб,  $t = 0,75$  мм

Отримані результати свідчать про можливість відстеження зміни параметрів об'єму матеріалу і пустот фрезерованих поверхонь при зміні режимів різання. Встановлено, що при збільшенні подачі на зуб в 3 рази об'єм піків матеріалу  $V_{mp}$  збільшився в 2,09 рази, об'єм ядер матеріалу  $V_{mc}$  – в 2,45, об'єм пустот ядер  $V_{vc}$  – в 2,48 і об'єм жолобів  $V_{vv}$  в 2,67 рази.

Отже даний метод характеристики поверхні є перспективним інструментом, який дозволяє оцінювати параметри поверхневого мікрорельєфу, які визначають функціональні властивості цих поверхонь.

УДК 681

Храбан Д.В., аспірант,  
Державний університет «Житомирська політехніка»

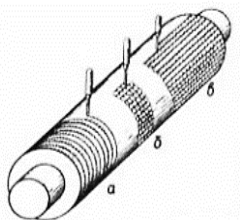
## ТОКАРНА ОБРОБКА НАПЛАВЛЕНИХ СТАЛЕЙ МАРТЕНСИТНОГО КЛАСУ ІНСТРУМЕНТОМ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

В результаті аналітичного дослідження зношених деталей циліндричної форми (абразивне, адгезійне, корозійне, тощо), підтверджено необхідність їх відновлення або заміни. В своїй більшості задля економічної ефективності

зношені вироби підлягають відновленню. Відновити спрацьовану деталь – означає поновити її початкові геометричні, фізико-механічні, фізико-хімічні та інші властивості (розміри, геометричну форму, структуру матеріалу). Найкращий спосіб відновлення – той, який гарантує найбільший термін служби деталі при найменших затратах. При капітальному ремонті техніки повторно після відновлення використовують до 70 % деталей. Трудомісткість відновлення деталей становить 45...55 % загальної трудомісткості капітального ремонту. Собівартість відновлення зазвичай не перевищує 60...70 % вартості нової деталі.

До відновних відносять операції, які змінюють геометричну форму та/або механічні характеристики, стан матеріалу деталі. До найбільш використовуваних технологійних операцій відносять напилення, наплавлення, металізацію поверхонь зношених деталей після їх підготовки. В цілому ланцюг технологічних операцій можна представити наступним чином: підготовка поверхонь для нанесення покриттів – власне нанесення покриттів шляхом напилення, наплавлення підготовлених поверхонь – токарна або абразивна обробка отриманих відновлених поверхонь. Ремонт деталі – технологічний процес по відновленню справності і працездатності деталі з умовою зміни її розмірів і форми до рівня, передбаченого нормативно-технічною документацією. Відновлення деталі – технологічний процес по відновленню справності і працездатності деталі з умовою відновлення її розмірів, форми або властивостей та зрубіжних вчених було підтверджено найбільш ефективний метод – наплавлення сталі мартенситного класу. Цей метод представляє собою технологічний процес нанесення плавного шару металу на поверхню металеві деталі за допомогою зварювання. Наплавленням можна багаторазово відновлювати спрацьовані деталі. У зв'язку з чим відновлена деталь наплавленням дешевша і при цьому вона не поступається в працездатності новій.

Наплавляють зовнішні і внутрішні поверхні деталей циліндричної форми (рис. 1), а також плоскі поверхні. При невеликому діаметрі деталі наплавлення виконують по гвинтовій лінії. На деталях великих розмірів наплавлення здійснюють валиками завдовжки 60...80 мм вздовж твірної. Плоскі поверхні деталей наплавляють валиками на всю довжину поверхні. Для ремонту і відновлення деталей наплавленням широко використовують розглянуті традиційні способи зварювання: дугове, газове.



*Рис. 1. Схема наплавлення тіла обертання:  
а – по гвинтовій лінії;  
б – вздовж твірної;  
в – вздовж твірної окремими валиками*

Відновлення наплавленням дозволяє збільшити термін служби деталей в 2–3 рази. Наплавлення деталей, як і повторне використання різних матеріалів, пов'язане з певними матеріальними і трудовими витратами, тому перед початком проведення цих робіт необхідно оцінити наскільки це доцільно з технічної і економічної точок зору їх здійснення. Технічна доцільність відновлення враховує: 1) унікальність деталі, яку треба відновити; 2) серійність відновних робіт для рядових деталей; 3) міру зношування; 4) наявність умов для збору, підготовки і відновлення деталей; 5) наявність матеріалів; 6) ресурс відновленої деталі.

Автор вважає за найбільш продуктивну технологічну операцію лезової обробки наплавленого матеріалу – токарну операцію з використання твердосплавних інструментів з покриттями або інструменту з надтвердих матеріалів. При цьому передбачається отримання діаметральних розмірів відновлення за 7-м квалітетом та шорсткістю поверхонь Ra 0,63-1,25 мкм. В передбачуваних лабораторних та виробничих дослідженнях планується використовувати для наплавлення дроти Hn-35, Hn-65, Hn-30Hfca, задля зменшення вартості відновлення при високій якості відновлюваних поверхонь, та отримання відповідних параметрів точності.

#### **Література:**

1. Конспект лекцій з дисципліни «Наплавлення та напилення» для студентів напрямку 6.050504 «Зварювання»/ Укладачі Г.І.Камель, Ю.А.Гасило. – Кам, янське: ДДТУ 2017, С 106.

2. [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/11/other/4\\_1\\_.pdf](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/11/other/4_1_.pdf)

УДК 621.914

**О.О. Катеринич**, аспірант,  
**Я.А. Степчин**, к.т.н., доц.

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ПЛОСКИХ ДОВГОМІРНИХ ДЕТАЛЕЙ ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ ДИНАМІКОЮ ПРОЦЕСУ**

Для потреб харчової промисловості актуальним є виготовлення плоских довгомірних деталей. З метою полегшення логістичних завдань для виготовлення таких деталей часто використовується лист як заготовка, а отже обробка кромки є однією з найважливіших аспектів виготовлення даних деталей. Матеріалами для виготовлення таких деталей є конструкційні та леговані сталі. У технологічних процесах виготовлення таких деталей від 30 до 60 % повинні мати шорсткість оброблених поверхонь не більше 1,6 мкм.

Останнім часом чистова обробка плоских поверхонь все частіше виконується торцевим фрезеруванням, як правило, стандартними торцевими фрезами, які мають низку недоліків. Їх усунення є важливим завданням, що може вирішуватися у кількох напрямках. Одним з них є проектування більш досконалих конструкцій фрез із комбінованими схемами різання з використанням, у тому числі, комбінування методів різання і поверхневого пластичного деформування (ППД).

Здебільшого відповідальні поверхні зазначених деталей обробляються чорновим фрезеруванням з подальшим шліфуванням. При цьому процеси плоского шліфування характеризуються можливими дефектами поверхневого шару у зв'язку з високотемпературним характером різання та значними зусиллями різання. Також виникають труднощі забезпечення необхідної шорсткості обробки за всією довжиною деталей, пов'язані зі зносом абразивних кругів. Процеси абразивної обробки, як відомо, відрізняються значно меншою продуктивністю по відношенню до процесів чистового торцевого фрезерування (у 3...5 разів) [2].

З точки зору багатьох дослідників, найбільш перспективним напрямом механічної обробки деталей машин і механізмів є застосування комбінованих способів обробки, які поділяються [3] залежно від:

- виду зовнішнього впливу (тиск, різання, фізико-хімічний);
- співвідношення головних рухів (один, два, три головних рухи);

Перспективними є комбіновані процеси, що поєднують обробку різанням та пластичним деформуванням.

Запровадження комбінації лезової обробки з ППД має суттєві переваги перед іншими способами, що полягають у такому:

- зміцнення поверхні без застосування хімічних, електричних і теплових впливів;
- можливість утворення необхідного рельєфу поверхні;
- відсутність потреби у додатковому обладнанні й відповідних фахівцях для обслуговування;
- екологічна безпечність процесу;
- скорочення тривалості технологічного процесу виготовлення деталей;
- суттєве підвищення продуктивності праці й зниження собівартості виробів;
- зниження енергетичних витрат у 1,5–2 рази;
- скорочення виробничих площ і кількості обладнання.

Під час обробки плоских поверхонь зазвичай використовуються конструкції фрез, за яких видалення припуску здійснюється:

- нерухомими в процесі обробки відносно корпусу фрези різальними ножами;
- ножами, що змінюють своє положення відносно корпусу фрези у процесі обробки



Разом з тим, при обробці плоских поверхонь заготовок малої ширини чистовими торцевими фрезами характеристики процесу різання мають свої особливості (рис. 1).

При торцевому чистовому фрезеруванні необхідно враховувати що, незалежно від кількості різальних елементів фрези, формування обробленої поверхні здійснюється тільки одним різальним елементом, який має найменшу відстань до обробленої поверхні. Це пояснюється тим, що розташувати всі різальні елементи в одній площині для забезпечення шорсткості обробки технічно неможливо. Але, якщо навіть випадково різальні елементи будуть розташовані в одній площині, при подальшому закріпленні фрези у шпинделі верстата завжди виникають похибки базування і закріплення, що призводить до перекосів фрези і неоднозначного розташування різальних елементів в одній площині. Положення ускладнюється також тим, що осі шпинделів верстатів мають відхилення від перпендикулярності відносно площини столів верстатів і радіальне та осьове биття, що також змінює положення фрези у просторі. Ще одним фактором, який суттєво впливає на положення торцевих фрез у процесі різання, є теплові деформації шпинделя верстата, які змінюються у часі. А незначний вплив кількості різальних елементів на зниження шорсткості обробки проявляється тільки за рахунок зменшення коливань сил різання та покращення динаміки процесів врізання різальних елементів та їх виходу із зони різання.

Особливості процесу обробки поверхонь заготовок малої ширини торцевими фрезами			
Використання неоптимальних швидкостей різання	Використання фрез малого діаметра	Малі значення подачі на оберт та частоти обертання фрез	Низька якість обробки
Низькі зносостійкість PE та надійність процесу	Мала кількість PE, що одночасно беруть участь у різанні, та погіршена динаміка процесу	Недостатня продуктивність обробки	Неоднорідність фізико-механічних характеристик та шорсткості оброблених поверхонь

*Рис. 1. Особливості процесу торцевого фрезерування поверхонь заготовок малої ширини*

Суттєвий вплив на кінцеву якість обробки мають вібрації, що виникають при різанні. Процес фрезерування (у тому числі торцевого) з точки зору визначення причин та механізму збудження коливального процесу при різанні, відрізняється складністю та непостійністю умов – впливає періодичність входу (виходу) різального леза в різання, безперервна зміна перерізу зрізу, різна кількість різальних лез, що приймають участь у різанні [4].

Особливість чистової обробки ступінчастими торцевими фрезами косокутного різання в тому, що оброблену поверхню формує тільки один

чистовий різальний елемент, який розміщений в осьовому напрямі на найбільшій відстані від торця фрези, а в радіальному напрямі – на найменшій відстані від осі фрези ( $r$ ). Відповідно, негативний вплив динамічної складової багатолезової обробки на шорсткість обробленої поверхні знижується.

Характерною особливістю торцевого фрезерування є неоднакова шорсткість за шириною обробки. Теоретична висота мікронерівностей обробленої поверхні (її геометрична складова) на певній базовій лінії залежить від її положення і розраховується за формулою:

$$Rz = \frac{S^2(r^2 - x^2)}{8Rr^2},$$

де  $r$  – радіальне розташування формоутворюючого чистового РЕ, мм;  $x$  – відстань від осі фрези до базової лінії на площині, на якій вимірюється шорсткість, мм.

**Висновок:** Проведений аналіз робіт [1-4] показує, що застосування процесів обробки плоских поверхонь деталей ступінчастими торцевими фрезами косокутного різання, дозволяє підвищити продуктивність обробки та зменшити кількість дефектів поверхневих шарів по відношенню до процесів абразивної обробки.

#### Література:

1. Виговський Г.М., Громовий О.А., Балицька Н.О., Глембоцька Л.Є. Удосконалення процесу чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей малої ширини. Науковий журнал «Технічна інженерія» Державного університету «Житомирська політехніка». Рубрика: «Прикладна механіка». 2021. №1 (87). С. 13-20.
2. Глембоцька Л.Є., Мельничук П.П. Схеми різання при обробці торцевими фрезами плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки», – 2006. №3 (38). С. 3-10.
3. Підвищення ефективності обробки плоских поверхонь фрезеруванням / П.П. Мельничук, Г.М. Виговський, О.А. Громовий та ін.; під ред. П.П. Мельничука. – Житомир : ФОП Євро-Волинь, 2017. – 287 с.
4. Мельничук П.П., Степчин Я.А. Динаміка процесу торцевого фрезерування при зношуванні різальних елементів. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №2 (61). – С. 33-40.

УДК 620.19

**Л. Я. Роп'як**, д.т.н., проф.,  
**М. В Шовкопляс**, аспірант,  
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ**

Аналіз сфер застосування різних видів покриттів показав, що серед неметалевих покриттів найбільш часто розповсюдженими є оксидні покриття, а серед металевих – хромові покриття. Електролітичне хромування займає чільне місце серед технологій формування зносостійких та корозійнотривких покриттів на алюмінії та сталі. Технологія електролітичного хромування в останні роки інтенсивно розвивається і все ширше знаходить застосування в машинобудуванні для зміцнення деталей машин як під час виготовлення нових, так і відновлення зношених завдяки простоті технологічного обладнання [1–3]. Хромування в електроліті, що містить сполуки шестивалентного хрому, використовується у промисловості тривалий час для нанесення твердих покриттів з відмінною стійкістю до зносу та корозії. Однак гальванічні ванни з шестивалентним хрому спричиняють шкідливий слід виробництва – мають токсичну дію, негативно впливають на здоров'я працівників і навколишнє середовище. Тому ведуться роботи з розроблення електролітів на основі трьохвалентного хрому, який є екологічно безпечним, а також і способів очищення та утилізації електролітів [4].

Умови формування товстих хромових покриттів в електроліті під час протікання електрохімічних реакцій призводять до зміни геометричних розмірів деталей та утворення на зовнішній поверхні покриття дефектного шару, а інколи й дендритних наростів. У зв'язку з цим необхідно проводити механічну обробку хромового покриття для забезпечення заданої шорсткості та точності розмірів робочих поверхонь деталей.

Мета роботи – дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні та силу різання.

Відомо, що хромові покриття характеризуються високою мікротвердістю, тому для їх механічної обробки вибрали шліфування алмазним кругом. Для проведення дослідження процесу круглого алмазного шліфування хромових покриттів, нанесених на зовнішню поверхню деталей зі сталі конструкційної легованої 40ХН (ГОСТ 4543–2016), провели повнофакторний експеримент  $2^3$  (8 дослідів). Для спрощення побудови математичних моделей прийняли степеневу функцію (лінійну швидкість алмазного круга прийняли постійною). Обробку результатів експерименту та перевірку моделей провели за стандартною методикою. Дослідили вплив режимів різання під час алмазного шліфування хромового покриття (глибина різання, швидкість обертання деталі, подовжня подача стола верстата) на шорсткість обробленої поверхні

(середньоарифметичне відхилення профілю  $Ra$ ), складові сил різання та питому витрату алмазів шліфувального круга.

На основі результатів проведених досліджень встановлено, що практично всі складові режимів різання впливають на величину шорсткості обробленої поверхні хромового покриття, складові сил різання та питому витрату алмазів. При цьому, на величину середньоарифметичне відхилення профілю  $Ra$  найбільший вплив має лінійна швидкість деталі.

### Література:

1. Kagajwala, B. Functional Trivalent Chromium Electroplating of Internal Diameters / Burhanuddin Kagajwala [et al.] // Products Finishing. Published 1/2/2013 – Digital Edition. – Mode of access: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>
2. Protsenko, V.S., Bobrova, L.S., Korniy, S.A., Kityk, A.A., Danilov, F.I. Corrosion resistance and protective properties of chromium coatings electrodeposited from an electrolyte based on deep eutectic solvent (2018) Functional Materials, 25 (3), pp. 539-545. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm25.03.539>
3. Чабан, С.Г., Ковра, О.В., Петров, В.М. Відновлення штоків силових гідроциліндрів автомобілів електролітичним хромуванням (2023) Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса), 1 (19), С. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.126-133>
4. Роп'як, Л.Я., Николайчук, М.Я., Шовкопляс, М.В., Романів, М.М., Витвицький, В.С., Білінський, В.М. Автоматизована установка для очищення гальванічних відходів (2021) Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», 2 (44), С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>

## **Процеси механічної обробки, верстати та інструмент**

Матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної  
конференції з міжнародною участю

9 – 10 листопада 2023 року, м. Житомир.

Комп'ютерна верстка:  
Шишкова О.А.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 17,0.

Державний університет «Житомирська політехніка»,  
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005