

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Застосування магнітно-абразивної обробки
для покращення якості твердосплавних виробів»

КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 «Галузь
машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_21
ШКАРУПА Владислав

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПСВ Станіслав

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудівної галузі, зокрема сільськогосподарського машинобудування, вимагає постійного вдосконалення конструкцій та технологій виготовлення різального інструменту. Це забезпечує високу якість обробки деталей, підвищену продуктивність праці та економічну ефективність виробництва. Особливе значення має підготовка та формування мікрогеометрії різальної кромки твердосплавних інструментів, оскільки саме вона визначає експлуатаційні характеристики, працездатність та довговічність.

На сьогоднішній день існує широкий спектр методів фінішної обробки різальних кромки, таких як шліфування, віброабразивна, струминно-абразивна обробка, обробка абразивними щітками та у вільному абразиві. Проте більшість з них мають суттєві обмеження щодо можливості контролю форми кромки, рівномірності обробки, енергоємності процесу та якості отриманих поверхонь. У зв'язку з цим актуальним є застосування інноваційних методів, що забезпечують комплексне поліпшення характеристик інструменту.

Одним із таких перспективних методів є магнітно-абразивна обробка (МАО), яка дозволяє одночасно впливати на мікрогеометрію різальної кромки, змінювати фізико-механічні властивості поверхневого шару та формувати залишкові стискаючі напруження. Використання МАО забезпечує підвищення працездатності, зниження зношування та покращення експлуатаційних характеристик твердосплавних інструментів.

Отже **метою** кваліфікаційної роботи є забезпечення високої працездатності багатограних непереточуваних твердосплавних пластин за рахунок формування радіусів заокруглення, форми різальних кромки магнітно-абразивною обробкою в умовах великих магітних щілин кільцевого типу.

Об'єктом розробки є процес механічної обробки збірним різцем зі змінною багатогранною твердосплавною пластинкою, а **предметом** – вплив параметрів магнітно-абразивної обробки та комплексної системи охолодження на формування мікрогеометрії різальної кромки та підвищення ефективності використання різального інструменту.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких **завдань**:

1 Виконати аналіз фінішних методів обробки твёрдосплавного РІ, що забезпечують формування показників його якості та працездатності БНТП.

2 Розробити методику досліджень МАО на експериментальній установці, а саме: матеріали БНТП; магнітно-абразивні матеріали. Запропонувати засоби вимірювання форми та радіусів заокруглення РК.

3 Експериментально дослідити вплив факторів процесу МАО на радіус заокруглення та форму РК.

4 Приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Механічні методи фінішної обробки

Забезпечити формування необхідних показників якості твёрдосплавного РІ, а саме БНТП, можливо саме на фінішних етапах їх виготовлення за рахунок цілеспрямованого впливу на фізико-механічні властивості поверхневого шару та макрогеометрію робочих поверхонь, що включають в себе РЗ. До характеристик, що впливають на працездатність відносяться: напружений стан приповерхневого шару, твердість, шорсткість робочих поверхонь та їх макрогеометрія, мікрогеометрія РК, яка включає в себе величину та форму радіусу заокруглення, відсутність на них мікроконцентраторів у вигляді викривлень та сколів.

Зазначені параметри, як правило, формуються на фінішних етапах обробки. При цьому забезпечується формування необхідного напруженого стану приповерхневого та поверхневого шару робочих поверхонь за рахунок поверхневого мікропластичного деформування, що супроводжується збільшенням густини дислокацій та ущільненням структури [1], підвищується твердість, знижується шорсткість, відбувається формування РЗ, зникають мікроконцентратори напружень.

1.1.1 Шліфування

На практиці одним із завершальних етапів виготовлення РІ є шліфування. Для твёрдосплавного РІ, через його специфічні механічні властивості, використовують переважно алмазне шліфування [2, 3]. Даний метод підвищення працездатності твёрдосплавного РІ набув широкого розповсюдження за рахунок формування в тонкому поверхневому шарі при силевій та термічній взаємодії (особливо локальній), стискаючих напружень, величина яких залежить від умов обробки і може досягати 2000...2500 МПа на глибині до 7...13 мкм [4, 5]. Дані зміни зумовлюють зміцнення поверхневого шару, зростає втомна міцність, підвищується твердість поверхневого шару, що важливо для підвищеної працездатності РІ. Але

при недотриманні режимів обробки відбувається протилежний ефект і в поверхневому шарі формуються несприятливі розгинаючі напруження, величина яких може досягати 1000 – 1500 МПа, внаслідок чого на поверхні можуть виникати мікротріщини, мати місце зниження межі міцності при згині.

Силова взаємодія при алмазному шліфуванні забезпечує зміцнення поверхневого шару за рахунок пластичного деформування зв'язуючої кобальтової складової та карбідних зерен, що супроводжується подрібненням блоків мозаїки. Тепловий фактор, навпаки сприяє формуванню розтягуючих напружень за рахунок неоднорідного термопластичного деформування. Тому для ефективного зміцнення твёрдосплавного РІ необхідно забезпечувати такі умови обробки, при яких буде мінімізований тепловий вплив на оброблювану поверхню при алмазному шліфуванні.

Зазначимо, що БНТП можуть мати різноманітну форму спеціальних стружколомаючих канавок на передній поверхні, а обробка цих конструктивних елементів алмазним шліфуванням вкрай складна, а подекуди взагалі неможлива. Для сучасного твёрдосплавного РІ важливим є формування сприятливої величини РЗ без концентраторів напружень, адже при шліфуванні твёрдосплавних пластин на РК, що розташовуються перпендикулярно до напрямку шліфування можуть утворюватись мікропошкодження та зазубрини, а на поверхнях утворюються риски шліфування [6, 7, 8].

Алмазне шліфування також використовується для формування фасок на різальних кромках інструменту. Вони можуть бути одинарні, подвійні, так і множинні з різноманітними симетричними та асиметричними формами РК, що повинно забезпечити їх стійкість та виключити утворення сколів та зазубрин при шліфуванні [9, 10]. Але застосування такого шліфування кромки значно обмежене просторовою формою РІ та не може бути використане для складних просторових РК.

Зменшити локальні сили різання, а тим самим і температури можливо при використанні алмазно-електролітичної обробки. При цьому зняття матеріалу відбувається за рахунок комбінування механічного різання алмазними зернами та електрохімічного розчинення та електроерозії [11].

Новітнім підходом до формування РЗ є фінішна обробка кінцевого РІ за допомогою абразивних кругів на каучуковій зв'язці [12], таку фінішну обробку можна виконувати на тих же шліфувальних верстатах, на яких виконують заточування (рисунок 1.1).

Принцип даного методу полягає в тому, що оброблюваний інструмент свердлить периферійну частину круга на глибину 1,5 мм, виконуючи при цьому один оберт. В результаті цього відбувається притуплення РК та видалення мікроконцентраторів напружень. Отримані параметри РК залежать від складу абразивного інструменту, швидкості різання та подачі, глибини врізання та кута свердління [13]. Даний метод підготовки РК ще не достатньо вивчений і потребує подальших досліджень для визначення усіх параметрів, що впливають на отримання позитивного результату.

Проведені дослідження показують, що після обробки РК має мікрофаску з плавними радіусами переходу до передньої та задньої поверхонь. Зазначимо, що лінійна швидкість різання для кінцевого РІ змінюється від осердя до периферії і при цьому будуть змінюватись параметри взаємодії між абразивним кругом вздовж торцевої РК, що приведе до отримання неоднорідної мікрогеометрії РК від осердя

до периферії. Зазначений метод підготовки РК фактично використовується в якості операції припрацювання і підготовки РІ до експлуатації в жорстких умовах і аналогічний за своєю дією до методів [14].

1.1.2 Віб्रोабразивна обробка

Сприятливий напружений стан поверхневого шару та мікрогеометрія поверхонь та РК БНТП, в порівнянні з алмазним шліфуванням та алмазно-електролітичною обробкою, можна отримати при використанні віб्रोабразивної обробки [15]. При віб्रोабразивній обробці поверхневий шар піддається поверхневу пластичному деформуванню за рахунок ударів частинок наповнювача (як правило, використовують бій абразивних кругів або сталі кульки) звантаженого разом з оброблюваними деталями в віброуючий контейнер, при цьому в поверхневих шарах оброблюваних деталей формується стискаючі напруження, які безпосередньо впливають на збільшення міцності, величина їх може досягати 2000...3000 МПа і вони можуть залягати на глибину 0,1 – 0,2 мм [4]. Відомі три основні схеми віб्रोабразивної обробки БНТП [15]:

- при рівномірному розташуванні оброблюваних пластин по об'єму робочої камери;
- при поштучному розміщенні пластин в окремих комірках ложементів заповнених абразивним матеріалом;
- при поштучному розташуванні пластин в окремих комірках касет.

При віб्रोабразивній обробці відбувається зникнення шорсткості поверхонь до величини Ra 0,32 – 0,63 мкм, відбувається заокруглення РК, зникає мікрорельєф від попередніх операцій шліфування. Недоліком цього методу є неможливість контролювати феру заокруглення РК, утворення на різальних кромках сколів та вириків за рахунок численних ударів вібротіл по оброблюваних поверхнях та, особливо, РК, що значно знижує робочі властивості інструменту, а при довготривалій обробці можливе зменшення товщини БНТП внаслідок стирання передньої поверхні при обробці певним типом абразивних зерен.

1.1.3 Струминно-абразивна обробка

Для фінішної обробки РІ використовують струминно-абразивну обробку [16, 72, 100, 130], яка широко використовується для очищення від окислини, доведення деталей складної просторової форми, для зміцнення поверхонь та для підготовки поверхонь перед нанесенням зносостійких покриттів [17]. Даний метод обробки підвищує міцність та працездатність РК [18].

Суть процесу струминно-абразивної обробки [16] полягає в тому, що на оброблювану поверхню або РК діє зі значною швидкістю струмінь абразивних зерен (рисунок 1.2), які виконують зміцнення поверхні та зміну її мікрогеометрії. Обробка відбувається завдяки наданню абразивним зернам великої кінетичної енергії, що забезпечує як мікропластичне деформування, так і видалення мікростружки. Кінетична енергія зернам надається за рахунок несучого середовища, яким може бути рідина або повітря. Також частинкам може надаватись енергія за рахунок відцентрових сил, в такому випадку обробка називається дробометною, при цьому поверхня бомбардується сферичними частинками, які називаються дробом. В якості оброблюваного матеріалу може використовуватись металевий, скляний, керамічний та льодяний дріб. Струминно-абразивна обробка залежить від густоти абразивного матеріалу, форми та розміру зерен, тиску потоку, кута спряження потоку та оброблюваних поверхонь [19, 20].

При взаємодії потоку з оброблюваною поверхнею, в результаті пружно-пластичного деформування, утворюється специфічна ямкова мікроструктура поверхневого шару [19], або джерельцева структура, фронт утворених хвиль розташовується перпендикулярно до проекції вектору швидкості потоку. Як і при попередніх схемах фінішної обробки в поверхневих шарах твердосплавного ПІ утворюються залишкові напруження стиснення, відбувається наклепування кобальтової фази та зміцнення карбідної, що сприяє зниженню ймовірності зародження тріщин втомі при експлуатації такого інструменту. Відзначимо, що при обробці деталей, які мають складну просторову форму має місце низька ефективність обробки всіх поверхонь, що відбувається через направлену дію потоку на оброблювану поверхню. Для запобігання даному недоліку необхідно використовувати декілька різнонаправлених струменів або задавати йому складну траєкторію руху, що значно ускладнює конструкцію устаткування. Відзначимо, що на РК можуть утворюватись сколювання, вигризування в результаті постійних мікроударів зерен по оброблюваній поверхні. Складним є контролювання зміни форми РК, також даний метод обробки поверхонь може приводити до погіршення їх шорсткості, що негативно впливає на якість виробів. У випадках застосування запропонованого методу обробки в якості підготовчої операції перед нанесенням зносостійких покриттів має місце зниження якості покриттів і самих виробів в результаті утворення на поверхнях ПІ локальних концентраторів напружень [17].

1.1.4 Обробка абразивними щітками

Обробка абразивними щітками використовується для зняття заусениць, окислини, видалення матеріалу, підвищення міцності, зносостійкості та корозійної стійкості поверхонь, для видалення мікрокрапельної структури після нанесення зносостійких покриттів, а також для оброблення РК інструменту [21]. Обробка щітками використовується для отримання радіусу заокруглення РК більше 20 мкм [6]. В якості оброблюваного інструменту використовують щітки у формі дисків, коліс або чашок [22]. Абразивні щітки складаються з полімерних ниток і можуть містити в собі абразивний матеріал, або можуть бути без абразивних включень. У

якості абразивного матеріалу використовуються пасти та гелі на основі карбїду силїцію, оксиду алюмінію, кубїчного нїтриду бору або полікристалїчного алмазу [20]. При другїй схемї можуть використовуватись натуральні волокна, що виконують роль притиру в процесї обробки. Як правило в таких схемах в якостї абразивного матеріалу використовується алмазна паста. Використовують щїтки з рїзними розмірами волокон та рїзною їх густиною та абразивні матеріали рїзної зернистостї для забезпечення найбїльш сприятливих умов обробки. Під час обробки нитки взаємодїють з лезом інструменту, чим досягається зняття матеріалу (рисунк 1.3) та утворення радіусу заокруглення R_k . В результатї ударів волокон по оброблюваних елементах в поверхневому шарї утворюються стискаючі напруження.

На ефективність процесу впливає швидкїсть обробки, зернистїсть абразивного матеріалу, позиціонування щїтки вїдносно пластини, глибина занурення оброблюваної поверхнї в щїтку та загальний час обробки. Значний вплив на кїнцевий результат має стан щетинок, оскїльки при зношеннї ниток зменшується величина видалення матеріалу. Для виправлення даного недолїку збїльшують час обробки, що в свою чергу призводить до підвищення температури [23].

Сучасний 5-координатний верстат (рисунк 1.4) дозволяє обробляти

інструмент різної просторової форми [24]. В даному випадку щітка може рухатись вздовж трьох осей X, Y, Z, а пластина встановлюється в спеціальному тримачі, який має можливість рухатись в напрямках А та С. Щітка може рухатись як з передньої на задню поверхню, так і з задньої на передню, що забезпечує формування асиметричної форми РК різної величини. Але тим не менше дана схема не забезпечує якісної обробки складного просторового інструменту.

Обробка абразивними щітками є високопродуктивним та ефективним методом обробки різального інструменту, виготовленого з різних матеріалів, але тим не менше вона має ряд недоліків. В процесі експлуатації має місце зношення волокон, що приводить до погіршення властивостей інструменту і, відповідно, до суттєвого збільшення значень дисперсії отриманих величин радіусів заокруглення РК. Також до недоліків можна віднести нерівномірність обробки внаслідок складності попадання окремих волокон в напіввідкриті поверхні з малими розмірами, і в результаті можливе утворення тіньових зон в яких обробка або не проходить

взагалі, або відбувається неефективно. Крім того під час обробки може відбуватись засалювання щітки, що знижує ефективність процесу.

1.1.5 Обробка у вільному абразиві

Обробка у вільному абразиві відома як тягове шліфування – це сучасний метод шліфування РІ, яке здійснюється у вільному абразиві геометрично невизначеним шліфувальним інструментом, у щільним інерційними силами [25]. Оброблювані деталі занурюються в контейнер, що містить вільні абразивні зерна, якими можуть бути керамічні матеріали, карбід силіцію, корунд, мелена пікаралупа волоського горіху та ін. В процесі обробки деталі здійснюють планетарний рух в абразивному середовищі з метою забезпечення рівномірної обробки РК та полірування поверхонь. Тягове шліфування може здійснюватись в умовах сухої та вологої обробки. Під час обробки деталі не контактують між собою на відміну від методу вібрабразивної обробки. На рисунку 1.5 представлений сучасний верстат тягового шліфування фірми OTEC Präzisionsfinish GmbH (Німеччина).

Обробка залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та матеріалу середовища, від швидкості та напрямку відносного переміщення деталей в робочій зоні, від глибини занурення оброблюваного інструменту в абразивне середовище, а також від загального часу обробки [21]. Даний метод використовується для заокруглення РК на складнопрофільному інструменті, такому як свердла, кінцеві та черв'ячні фрези. За допомогою даного методу можна формувати радіуси заокруглення РК величиною 4 – 40 мкм [27].

Даний метод має ряд недоліків, головним з яких є неможливість керування формою заокруглення РК, тобто К-фактором [7]. Під час обробки різні частини довгомірних деталей знаходяться на різній глибині в робочому середовищі, що супроводжується різними величинами сил, які діють на ці оброблювані елементи, що спричиняє нерівномірну обробку по довжині оброблюваних деталей. При шліфуванні твердого сплаву виникають недостатні зусилля притискання зерен до оброблюваних поверхонь, що може значно знизити продуктивність роботи та збільшити час обробки.

Зазначені вище методи обробки забезпечують формування лише окремих показників якості: або покращують мікрогеометрію, або підвищують поверхневу твердість, або знижують шорсткість, або збільшують міцність, або збільшують запас енергії поверхонь. Саме тому актуальними є методи комплексного впливу на робочі елементи РІ, які забезпечують одночасне формування сприятливої мікрогеометрії РК із заданими радіусами заокруглення, підвищення поверхневої твердості та зниження шорсткості передньої, задньої поверхні та РК.

1.1.5 Магнітно-абразивна обробка

Зважаючи на необхідність комплексного покращення показників якості твердосплавного РІ, виділимо досить перспективний метод магнітно-абразивної обробки. Ці доцільно використовувати на фінішних етапах виготовлення різноманітних виробів [28]. Даний метод відноситься до групи поліруючо-зміцнюючих методів обробки, і реалізується в середовищі магнітно-абразивного порошку (МАП), який в процесі обробки формується магнітним полем в магнітно-

абразивному інструменті (МАІ), при відносному русі оброблюваних деталей та порошкового магнітно-абразивного матеріалу.

Для обробки РІ, як правило, застосовують два види установок для МАО, які відрізняються за кінематичною схемою процесу та типом магнітів.

При першій схемі МАО відносно практично нерухомого оброблюваного інструменту (у випадку кінцевого РІ він може обертатись навколо власної осі та здійснювати поздовжній рух) рухаються з різною швидкістю два диски з розташованою на торцях сіткою з постійних магнітів на яких розташовується МАІ товщиною 5 – 7 мм [28, 29]. Ця схема зображена на рисунку 1.6.

При другій схемі використовуються електромагніти з полюсними наконечниками, а відносьне переміщення МАІ та оброблюваних деталей здійснюється за рахунок руху інструменту, що включає рух оправки вздовж магнітної зони верстату та обертання її з закріпленим інструментом навколо власної осі. Друга схема має ряд переваг перед першою, найбільша з них – це забезпечення рівномірної обробки складнопрофільних деталей, таких як свердла та кінцеві фрези, оскільки відносний рух МАІ та поверхонь оброблюваних деталей забезпечується складною траєкторією руху оправки в робочій зоні, яка має кільцеву форму [21] та можливість керувати швидкістю МАІ, змінюючи силу струму в обмотках електромагнітів. Магнітне поле в даному випадку виконує роль віртуальної зв'язки,

жорсткість якої можна регулювати в широких межах, наближуючи інструмент за своїми властивостями до вільного абразиву або до жорстко зв'язаного.

Метод MAO дозволяє комплексно впливати на стан поверхневого шару, змінюючи його фізико-механічні властивості та мікрогеометрію як робочих поверхонь PI, так і РК. При MAO PI відбувається видалення задирок, полірування робочих поверхонь та РК, зміцнення поверхневого шару, формування в приповерхневому шарі залишкових стискаючих напружень, підвищення корозійної стійкості, контактної втомної довговічності. Дані зміни відбуваються за рахунок мікрорізання та пластичного деформування. Відзначається також в роботах [31, 32, 33] дія зовнішнього магнітного поля на підвищення експлуатаційних характеристик деталей, що відбувається за рахунок зміни фізико-механічних властивостей та структури в об'ємі матеріалу.

При MAO локальні температури не перевищують 200°C. Відбувається активне відведення мікростружки із зони різання, тим самим запобігаючи засалюванню MAI, відбувається "м'який" вплив на оброблювані поверхні, активно перемішуються абразивні зерна, забезпечуючи постійну стабільну різальну здатність MAI. Також до переваг MAO віднесемо можливість керованого регулювання жорсткості MAI в широких межах, що забезпечує різне зусилля притискання MAI до оброблюваних поверхонь.

1.2 Фізико-механічні методи фінішної обробки

В сучасному виробництві використовують цілу низку фізико-механічних методів обробки, які забезпечують таке оброблення деталей, що при використанні звичайних механічних методів неможливе або надто дороге та складне. Розглянемо основні методи фізико-механічної обробки, які використовуються для фінішної обробки твердосплавного PI.

1.2.1 Лазерна обробка

Лазерна обробка широко використовується для модифікування структури поверхневого шару різних матеріалів, таких як сталі, тверді сплави та інші, дана обробка забезпечує підвищення їх експлуатаційних властивостей. На даний момент існує 3 основних напрямки зміцнення твердого сплаву, це:

імпульсна лазерна обробка;

безперервна лазерна обробка;

текстурування передньої поверхні лазерним променем [34].

При зміцненні поверхневого шару може виникати сітка тріщин на поверхні обробленої поверхні, під якою знаходиться зміцнена зона. Такий дефектний шар необхідно видаляти, що значно збільшує трудомісткість процесу.

Роздроблений метод об'ємного імпульсного лазерного зміцнення дозволяє модифікувати структуру матеріалу по локальному об'ємі (до 30 мм в усіх напрямках від місця дії лазерного імпульсу) [35]. Лазерний імпульс викликає проходження через деталь пружної ударної хвилі, яка приводить до зміцнення матеріалу. Відмітимо, що в місці прикладання імпульсу виникає тріпали.

Також лазерна обробка знайшла застосування при формуванні РК. В процесі обробки лазерний промінь випаровує матеріал і таким чином відбувається формування РК. Але це супроводжується виникненням високих температур в зоні обробки, які призводять до утворення розтягуючих напружень в поверхневих та приповерхневих шарах оброблюваної зони [36], що є небажаним для експлуатації РІ. Було визначено, що за 10 с обробки можна сформувати різальні кромки з величиною 9 – 47 мкм з точністю до 1,5 мкм [37].

За допомогою даного методу можливо формувати мікрогеометрію РК на РІ виготовленому з різноманітних матеріалів, навіть з надтвердих. Але на сьогоднішній день лазерна обробка РК ще не достатньо керована і потребує подальших досліджень. Головними недоліками є зміна напруженого стану поверхонь та локальний вплив променя на РІ, що дуже негативно впливає на працездатність обробленого РІ. Також даний метод є досить дорогим та енергоємним, а його контролювання досить складним.

1.2.2 Електроерозійна обробка

Даний метод електротермальної обробки використовується для підготовки РК інструменту, виготовленого з різних матеріалів, навіть найтвєдших [38]. Він забезпечує формування на РК різноманітної форми радіусів або фаски, а також використовується для текстурування передньої поверхні РК з метою зменшення сил різання, за рахунок утримання за допомогою ізотропної структури змащувальних речовин [39]. Принцип роботи полягає в тому, що між деталлю та електродом в діелектричному середовищі (рідина або газ) виникають дискретні розряди, що забезпечують нагрівання, розплав та часткове випарювання матеріалу, відокремлений охолоджений матеріал з зони обробки видаляється за допомогою потоку діелектричного середовища [40], а на місці обробки виникають ерозійні лунки. Незважаючи на локальність та невеликі розміри зони обробки в обробленій поверхні виникають залишкові розтинаючі напруження [41], які можуть негативно впливати на працездатність РК. Зважаючи на принцип даного методу, він не може бути використаний для обробки неелектропровідних матеріалів. А загальний його вплив на працездатність РК потребує подальших ґрунтовлих досліджень.

1.3 Методи нанесення зносостійких покриттів

Широкого розповсюдження для підвищення працездатності РК набули методи нанесення зносостійких покриттів, які дають можливість наносити на робочі поверхні, для підвищення ефективності їх експлуатації [42], різноманітні матеріали та сплави. В більшості випадків працездатність РК залежить саме від властивостей поверхневих шарів, які пошкоджуються в процесі експлуатації на багато раніше ніж основа [43]. Використання покриттів сприяє збільшенню терміну експлуатації РК [44] за рахунок зміцнення поверхневого шару, збільшення твердості поверхонь, зниження температури безпосередньо в зоні різання.

Розроблений цілий ряд способів та методів нанесення тонких зносостійких покриттів на робочі елементи РК. Серед них найголовнішими є: хіміко-термічна

обробка, іонне осадження покриттів, фізичне осадження покриттів (PVD), хімічне осадження покриттів (CVD).

1.3.1 Хіміко-термічна обробка

Хіміко-термічна обробка – це метод зміни хімічного складу, структури, та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів за рахунок хімічного та термічного впливу [45]. Отримувані властивості поверхневих шарів залежать від складу насичуючого середовища, температури та тривалості процесу. Для PI важливими є отримання великої твердості, теплостійкості, зносостійкості, що може бути забезпечено при нанесенні тугоплавких сполук, таких як карбіди, бориди перехідних металів [46]. Для тврдсплавного PI найбільшого поширення набули саме карбідні багатошарові покриття на основі сполук двох або більше елементів [47]. Поряд з перевагами даний метод нанесення покриттів має ряд суттєвих, для PI, недоліків – в результаті покривання утворюється небезпечна перехідна зона між покриттям та основою, в якій утворюється позитивні напруження, що сприяють сколюванню покриттів в процесі їх експлуатації [48]. Тому для покращення якості покриття перспективним є попередня механічна обробка, яка формує негативні напруження в глибині основи, а покриття та поверхневий шар будуть мати сприятливі для PI стискаючі напруження, або наступна фінішна обробка, що забезпечить переміщення несприятливих залишкових напружень в глибину основи. Також відзначимо значне погіршення шорсткості поверхонь після обробки до величини R_a 0,8 – 1 мкм та значну тривалість процесу.

1.3.2 Іонне осадження покриттів

Іонне осадження покриттів полягає в осадженні газоподібних іонізованих (в плазмі тліючого розряду) часток металу на поверхні PI [48, 49]. Це є поєднання традиційного вакуумного осадження та плазмової технології. Осаджувані частки мають кінетичну енергію і утворюють складну структуру нанесеного шару. А також дана технологія дозволяє рівномірно покрити усі поверхні складнопрофільних

виробів. Недоліками є погіршення шорсткості поверхонь, що може бути вирішено за рахунок послідуєчого полірування та недостатня міцність зчеплення між основою та покриттям, що вирішується більш високою якістю підготовки поверхонь перед нанесенням покриття.

1.3.3 Фізичне осадження покриттів

Широкого розповсюдження для нанесення тонких зносостійких плівок на тврдосплавний та керамічний PI, на деталі авіаційної промисловості та конструкційні деталі набув метод фізичного осадження покриттів (PVD – Physical vapor deposition) [20, 51, 52]. За рахунок осадження TiN, TiAlN, TiC, TiCN та інших покриттів вдаєтьс значно підвищити строк служби інструменту та підвищити його продуктивність праці, за рахунок підвищених швидкостей різання та зменшення зношення [53, 54]. Застосування даного методу осадження забезпечує отримання покриттів з заданими властивостями по товщині, складу та структурі, що забезпечує підвищення стійкості PI [55] за рахунок високої твердості, високих трибологічних властивостей [56] та низької хімічної активності. Крім вищезгаданих позитивних властивостей PVD покриттів відзначимо зниження собівартості процесу різання за рахунок підвищення швидкості різання та зменшення використання змащуючо-охолоджуючих речовин, оскільки такий PI здатен зберігати свою працездатність без їх використання. Також за допомогою даного методу можливо формувати наноструктуровані покриття з товщиною 3 – 4 мкм, які містять до 1000 шарів [57] і які можуть працювати при вищих температурах аж до 1100° C [54]. Саме ця технологія найбільше розвиваєтьс в сучасному виробництві. В роботі [50] визначено, що при нанесенні багатошарових покриттів на основі Ti можливо досягти мікротвердості покриття 35 – 36 ГПа та індекс пластичності 0,11 – 0,12, а максимальні залишкові напруження становлять більше 7,5 ГПа.

Метод PVD осадження відбуваєтьс у вакуумі шляхом конденсації парів матеріалу з газової фази [48], при цьому пари осаджуваного матеріалу конденсуютьс на поверхнях PI, які нагріті до певної температури для отримання необхідної структури покриття та адгезійної міцності. Процес відбуваєтьс при

відносно невисоких температурах (до 450°C) у вакуумі (10⁻³ Па) або атмосфері інертного та реакційного газів (азот або ацетилен) при невисокому тиску (близько 1 Па) для мінімізації кількості зіткнень атомів та частинок покриваемого матеріалу з атомами та молекулами газу.

В роботі [51] визначено, що при нанесенні одношарових та багатшарових покриттів на тверді сплави BK4 – BK10 та T5K10 вдається значно підвищити ресурс їх роботи за рахунок високої твердості покриттів, врахування адгезійної взаємодії матеріалу покриття та матеріалу оброблюваної деталі, що приводить до зниження сил різання [58], все це в сукупності дає значний ріст стійкості РІ. Також вдається зменшити зношення твердосплавного РІ виготовленого з BK6OM при обробці жароміцних сталей та титанових сплавів при використанні таких покриттів, що є безумовно актуальним в умовах потреб сучасного виробництва.

Одним з недоліків цього методу є нанесення матеріалу покриття лише на поверхні деталей, які орієнтовані до джерела. Тому в процесі осадження деталі рухаються відносно джерел, як правило здійснюючи складний планетарний рух, або використовують декілька джерел, що розташовуються певним чином відносно деталей. Після покриття погіршується шорсткість поверхонь через мікрокапельну структуру [53], яка може виникати в процесі осадження.

1.3.4 Хімічне осадження покриттів

Ще одним методом формування зносостійких покриттів на РІ є хімічне осадження (CVD – Chemical vapor deposition), яке полягає у формуванні навколо деталі газоподібних летючих сполук елементів, які при протіканні хімічної реакції осаджуються на поверхні. Даний метод отримав широке розповсюдження для нанесення одношарових та багатшарових покриттів на основі TiN, TiC, TiCN, а також Al₂O₃ на РІ [48, 59], забезпечуючи більш високі режими різання та більшу стійкість [55]. Кожен шар виконує певне функціональне навантаження: TiN, TiC, TiCN – забезпечують стійкість до зношення, Al₂O₃ – хімічно нейтральний шар з низькою теплопровідністю, що забезпечує тепловий бар'єр та стійкість сплаву до лункоутворення. Покриття отримують в реакторах в яких створюється реакційне

середовище, а в стінках є отвори для подачі та випуску газу [60]. Процес хімічного осадження покриттів може проводитись при нормальному атмосферному тиску, або при зниженому, що дозволяє отримати однорідні плівки на деталях складної просторової форми. Зазвичай осадження проводять при температурі 1000 – 1200°C. В процесі покривання формується перехідна зона між покриттям та основою.

CVD покриття забезпечує підвищення стійкості твердосплавного PI, за рахунок їх високої твердості, низької теплопровідності та хімічної активності. В роботі [61] було досліджено вплив низької теплопровідності тришарового CVD покриття TiC/TiCN/TiN на напружений стан поверхневого шару обробленої деталі. Визначено, що при обробці покритим PI в поверхневому шарі формуються більші залишкові напруження, які залягають глибше ніж при обробці PI без покриття. Це супроводжується вищим деформаційним зміцненням деталі. Головними недолками даного методу є використання вибухонебезпечних середовищ, зниження шорсткості після нанесення покриттів та формування перехідної зони з розтинаючими напруженнями, що може бути виправлено попередньою обробкою перед нанесенням покриття та наступним поліруванням після покривання.

В сучасному виробництві широкого розповсюдження набула технологія осадження алмазоподібного покриття на PI [62]. Такі покриття наносяться за допомогою методу хімічного осадження покриттів при відносно низьких температурах, або за допомогою методу фізичного осадження покриттів [63], і в світовій практиці називаються DLC (diamond-like carbon) покриттями.

Таке покриття має високу твердість, низький коефіцієнт тертя (до 0,2) та високу хімічну стабільність, але безпосереднє нанесення такого покриття на кобальтовмісні тверді сплави супроводжується певними складнощами, оскільки кобальт може бути катализатором утворення графіту та інших несмазних фаз, що приводить до низької адгезії покриття з основою інструменту [64]. Тому використання таких покриттів обмежене твердими сплавами з вмістом кобальту до 10% [65], а перед його нанесенням необхідна попередня обробка для зменшення кількості зв'язуючої кобальтової фази в приповерхневих шарах PI. DLC покриття забезпечує зменшення сил різання за рахунок низької теплопровідності, що попереджає прилипання матеріалу заготовки до передньої поверхні інструменту, та високих трибологічних

властивостей алмазу, що знижує сили тертя та полегшує відведення стружки [63]. Такі покриття мають велику перспективу при обробці неметалевих та композитних матеріалів. Але через низьку термостабільність при температурі більше 200 – 300° С відбувається їх деструктуризація.

1.4 Покращення працездатності

Форма та розміри РК мають значний вплив на процес різання. На них в процесі обробки діють значні механічні та термічні навантаження. Тому для підвищення продуктивності та якості обробки необхідно велику увагу приділяти саме стану РК. Тому якість оброблених деталей, стійкість та надійність РІ значно залежать саме від стану РК інструменту [66, 67], а для підвищення працездатності твердосплавного РІ це має ключове значення. Саме тому в останні роки суттєву увагу приділяють питанням підготовки та формуванню РК різноманітного РІ. Використання РІ з РК оптимальної форми з заданою мікрогеометрією крім покращення якості обробки, може забезпечити зменшення вартості обробки, особливо важкооброблюваних матеріалів. Розробка нової вимірювальної техніки, яка дозволяє з великою точністю вимірювати величину та форму РК, забезпечила науковцям можливість сконцентрувати свою увагу на мікрогеометрії кромок РК – це просторова лінія, яка утворена на перетині передньої та задньої поверхонь РІ. Після спікання та шліфування у БНП вона гостра, але така РК не завжди сприятлива при обробці різанням, оскільки вона має низьку механічну міцність. На РК без додаткової фінішної обробки присутні сколи, викришування, мікротріщин, підвищена шорсткість, що викликають передчасну втрату ними працездатності [23]. При підготовці РК можливо вирішити дані недоліки та сформувати необхідну форму РК, щоб вона могла виконувати свої функції та не втрачати свої властивості при робочих навантаженнях.

Для покращення контактних процесів в процесі різання розроблено спеціальні форми РК, які можуть бути округлими, можуть мати одну або декілька мікрофасок, а можуть поєднувати фаски та заокруглення [20, 68]. На рисунку 1.7 представлені можливі варіанти форм РК. Кожен тип РК, знаходить своє практичне застосування.

Як правило, заокругленні РК використовують при чистовій, напівчистовій, прецизійній та мікромеханічній обробці алмазним, твердосплавним та швидкорізальним РІ, а РК з фаскою при точінні важкооброблюваних матеріалів, чорновій обробці та переривчастому різанні інструментами, виготовленими з кубічного нітриду бору та кераміки [68].

Тому для формування необхідної величини та форми радіусу заокруглення РІ використовують різні методи фінішної доводки. Також потрібно враховувати реальний стан робочих поверхонь, адже після спікання та/або шліфування на поверхні присутні нерівності, сколи та несприятливі залишкові напруження, що призводять до зменшення строку служби інструменту [69]. Зазначимо, що фінішні методи обробки широко використовуються для підготовки поверхонь перед

нанесенням тонких зносостійких покриттів, вони забезпечують формування необхідної мікрогеометрії поверхонь та зниження залишкових напружень в субстраті, які виникають при спіканні та шліфуванні. Виконують обробку вже покритого інструменту для зменшення шорсткості, видалення мікрокапельної фази та формування сприятливого напруженого стану покриття та субстрату.

У роботі [24] запропоновано описувати мікрогеометрію заокруглених РК параметрами Δr , φ , S_γ , S_α , що дозволяє більш точно характеризувати РК, адже заокруглена РК не завжди є симетричною та з постійною величиною радіусу заокруглення. Також було запропоновано класифікувати форму заокругленої РК за величиною К-фактору (форм-фактором), який визначається як співвідношення S_γ/S_α , де S_α та S_γ – це відстань між точкою розділу заокругленої РК, точкою в якій починається перехід від плоскої поверхні до заокругленої РК, та кінчиком інструменту з ідеально гострою РК на задній та передній поверхнях відповідно. Δr та кут φ описує затуплення РІ та вимірюється як найкоротша відстань та зміщення між ідеально гострою та заокругленою РК [69].

Таким чином форму РК можна розділити на 3 класи:

- $K = 1$ – описує симетричну мікрогеометрію РК;
- $K > 1$ – вказує на нахил на передню поверхню,
- $K < 1$ – вказує на нахил на задню поверхню.

Визначено, що величина К-фактору має значний вплив не тільки на механізм зношення РІ, а й на механічне та термальне навантаження РК. Асиметрична РК має переваги завдяки великому впливу на поведінку РІ в процесі роботи [70]. Сукупність усіх вище зазначених параметрів дозволяє в повній та достатній мірі описати мікрогеометрію РК.

Для симетрично заокругленої РК зі збільшенням величини її радіусу заокруглення збільшуються розмір зони гальмування матеріалу перед РК та висота точки розділу матеріалу. Для несиметричної РК величина зони гальмування матеріалу менша в порівнянні з симетричною РК, а на висоту точки розділення матеріалу найбільший вплив має саме величина S_α , в той час коли S_γ на ці параметри значного впливу не має [71]. Також величина S_α має значний термічний вплив на РК

[72], що є результатом збільшення площі контакту між задньою поверхнею та оброблюваною деталлю.

Форма РК має безпосередній вплив на складові сили різання та траєкторію руху матеріалу при різанні. В порівнянні з гострим РК у заокруглених сила різання та подачі більші, а при однакових умовах різання та при збільшенні величини заокруглення РК вона може бути лінійно апроксимована і зі збільшенням величини радіусу сили різання ростуть [70]. При збільшенні радіусу заокруглення РК зростають і середні сили різання, але для асиметричних РК ці величини будуть значно менші, ніж для симетричних з такою ж величиною радіусу заокруглення, незалежно від величини K -фактору. А величина осьової сили для РК з переважанням S_{γ} буде меншою, що пояснюється збільшенням сил тертя [71].

Важливо відмітити, що величина та форма радіусу заокруглення РК має відповідати типу різання, режимам різання та властивостям інструментального та оброблюваного матеріалів [23].

Окрім зазначеної мікрогеометрії РК, на працездатність твродосплавного РІ має вплив сукупність факторів, забезпечуючи які можливо підвищити стійкість (рисунок 1.8). До них можна віднести: умови роботи, макрогеометрія РІ, фізико-механічні властивості інструментального та оброблюваного матеріалів, трибологічні, адгезійні та інші властивості в парі інструментального та оброблюваного матеріалів. Що в сукупності визначають параметри різання, деформування та термічної взаємодії в процесі обробки.

Таким чином, для покращення процесу різання та збільшення продуктивності обробки, окрім широко відомих параметрів РІ, необхідно формувати спеціальну мікрогеометрію РК. Адже саме на кромку припадає основний механічний та термічний вплив в процесі обробки, що може викликати передчасну втрату нею своїх властивостей, що приводить як до погіршення якості обробки, так і до повної відмови РІ.

Одним з ефективних та комплексних методів підготовки РК є саме метод MAO, який дозволяє формувати не тільки округлену форму РК, а й необхідну величину K -фактору, що має безпосередній вплив на температури та сили різання.

Тому необхідно розглянути процес МАО обробки для широких робочих зон, адже при такій схемі можна ефективно обробляти різноманітний РІ

Висновки до розділу 1

1. У результаті проведеного аналізу існуючих досліджень встановлено, що якість та працездатність твердосплавного різального інструменту (РІ) значною мірою визначаються станом його поверхневих шарів та мікрогеометрією різальної кромки (РК). Саме фінішні методи обробки відіграють ключову роль у формуванні необхідних експлуатаційних характеристик РІ – забезпечують сприятливий напружений стан приповерхнього шару, підвищення твердості, зниження шорсткості, видалення мікродфектів та утворення необхідної форми і величини заокруглення РК.

2. Проаналізовані механічні методи фінішної обробки (шліфування, віброабразивна, струминно-абразивна, щіткова обробка, обробка у вільному абразиві) забезпечують покращення окремих показників якості РІ, проте часто мають обмеження щодо керованості форми РК, рівномірності обробки чи термічного впливу. Серед них найбільш перспективною технологією комплексного впливу є магнітно-абразивна обробка (МАО), яка дозволяє одночасно змінювати фізико-механічні властивості поверхневого шару, формувати задану мікрогеометрію РК та забезпечувати необхідний рівень залишкових стискаючих напружень.

3. Фізико-механічні методи, такі як лазерна та електроерозійна обробка, відкривають нові можливості для модифікації структури поверхневих шарів та формування РК навіть у надтвердих матеріалів, однак вони потребують подальшого вдосконалення через складність керування процесом, високу енергетичність та небажані зміни напруженого стану.

4. Методи нанесення зносостійких покриттів (хіміко-термічна обробка, іонне, фізичне та хімічне осадження) істотно підвищують експлуатаційні характеристики РІ за рахунок зміцнення поверхневого шару, підвищення твердості, теплостійкості та зносостійкості. Особливу увагу заслуговують багатошарові PVD- та CVD-покриття, а також DLC-покриття, які значно збільшують ресурс роботи інструменту, хоча їх ефективність багато в чому залежить від якості попередньої фінішної обробки поверхонь.

5. Форма та мікрогеометрія РК мають вирішальний вплив на працездатність РІ, сили різання, механізм зношення та термічне навантаження. Оптимізація параметрів РК, зокрема К-фактору, дозволяє покращити робочі характеристики інструменту та забезпечити стабільну якість обробки матеріалів.

Таким чином, комплексний підхід до фінішної обробки, що поєднує оптимізацію мікрогеометрії РК, формування сприятливого напруженого стану та нанесення зносостійких покриттів, є ключовим напрямом підвищення працездатності та довговічності твердосплавного різального інструменту.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали досліджень

Експериментальні дослідження виконували на твердосплавних пластинках різних типів, які представляють основну гамму типорозмірів та форм, що використовуються в сучасному виробництві: FNMM 110408, PNMM 120408 (рисунок 2.1, а), SEAN 1203AFTN-M14-K (рисунок 2.1, б), PNMA 110408 (рисунок 2.1, в), SNMA 120408 (рисунок 2.1, г), SNMG 120412, SNMM 120412, WNMG 120408. Пластини виготовлені з твердих сплавів BK8, BK6OM (K10), T15K6 та кермету NX фірми SECO.

2.2 Магнітно-абразивні матеріали

Для МАО твердосплавних деталей використовують механічні суміші та литі порошки з підвищеною твердістю зерен. До переваг механічних сумішей відноситься простота виготовлення та можливість використання різноманітних абразивних матеріалів [78]. У якості магнітного наповнювача використовували дріб чавунний колотий (ДЧК) з розмірами зерен 1000/630 мкм, 400/315 мкм (рисунок 2.2, а), 200/100 мкм (рисунок 2.2, б) та литий порошок Феромап зернистістю 200/100 мкм (рисунок 2.2, в).

Коефіцієнти нерівності використаних порошків рівні 1,42 – 1,57. У якості абразивної складової використовувалась алмазна паста з зернистістю 28/14 мкм, 20/14 мкм, 14/10 мкм, 3/2 мкм та 2/1 мкм. Окрім обробки із диспергуванням матеріалу для проведення зміцнювальної обробки за рахунок мікроударів магнітно-абразивних порошків (МАП) по оброблюваних поверхнях використовували чавунні кульки з розмірами зерен 1200/900 мкм (рисунк 2.2, г). У якості змащуючи-охолоджуючого технологічного середовища використовували АСФОЛ, який складається з синтетичних та рослинних олій [79].

2.3 Вимірювання форми та радіусів заокруглення різальної кромки

Геометричні характеристики РК визначаються величинами радіусу округлення та К-фактору. Дані параметри можливо вимірювати тактильним та оптичним методами. В усіх випадках радіус заокруглення та інші параметри РК визначаються в перпендикулярному до неї перетині. При тактильних методах вимірювання в якості датчика використовують щуп у вигляді голки, а вимірювання виконують на координатно-вимірювальних машинах [80]. Такий метод забезпечує вимірювання обмеженої ділянки профілю в одному перетині та займає багато часу. При оптичному методі вимірювання створюється 3D модель ділянки РК, а сам процес вимірювання займає на багато менше часу в порівнянні з тактильним [23]. На сьогодні немає визначеного стандарту по вимірюванню мікрогеометрії РК, тому для якісного порівняння отриманих результатів необхідно виконувати вимірювання за допомогою одного методу. А для точного та якісного опису РК найкраще підходить метод формфактору, який характеризує мікрогеометрію РК за величиною К-фактору та радіусом заокруглення.

Вимірювання мікрогеометричних характеристик РК виконували на оптичному приладі МікросAD (рисунк 2.3), що дозволяє визначати форму та радіус заокруглення РК в необхідних перетинах.

2.4 Експериментальна установка типу «кільцева ванна»

Експериментальна установка типу «кільцева ванна» є універсальною і призначена для МАО РІ, лопаток газотурбінних двигунів, циліндричних та інших складнопрофільних деталей. Вона змонтована на базі вертикально фрезерного верстата (рисунок 2.4). Така схема забезпечує базування оброблюваних деталей під необхідними кутами ρ та φ .

Магнітна система установки складається із двох кільцевидних коаксіально направлених полюсних наконечників 1, які формують робочу зону 2 що заповнюється МАП. Діаметр кільцевої ванни дорівнює 200 мм, а її висота 50 мм.

Для обробки БНТП на установці даного типу використовується універсальна головка, яка встановлюється в шпинделі верстата таким чином, щоб її вертикальна вісь співпадала з віссю кільцевої магнітної системи і шпинделя верстата, і являє собою базову плиту 3 на якій з одного боку закріплюється з можливістю повороту навколо вертикальної осі пристрій повороту оправки відносно площини обертання (площини кільцевої ванни) 1. В пристрої встановлено мінішпиндель 4, у якому закріплюється оправка 5 з оброблюваною БНТП. Оправка 5 має можливість вільно обертатися навколо власної осі і осі мінішпинделя 4. З протилежного від місця кріплення інструменту боку на осі мінішпинделя 4 встановлено редуктор, який з'єднано з двигуном постійного струму.

Таким чином налаштування оправки з БНТП можна виконувати поворотом універсальної головки навколо вертикальної осі (q) та поворотом оправки відносно головки в вертикальній площині (p), що забезпечує всі можливі варіанти базування пластин в робочій зоні. В процесі MAO оброблювана пластина закріплена на оправці

обертається навколо власної осі та навколо осі кільцевої ванни разом з універсальною головкою.

Обробку БНТП виконували в режимі «натікання», «стікання» та «натікання з оправки» (рисунок 2.5).

Висновки до розділу 2

1. Наведено матеріали досліджень у виді твёрдосплавних пластин різних типів та форм.
2. Наведено характеристики магнітно абразивних матеріалів, що використовуються при МАО.
3. Вимірювання мікрогеометричних характеристик РК рекомендовано виконувати на оптичному приладі МікроCAD.
4. Наведено конструкцію експериментальної установки типу «кільцева ванна» для МАО.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Експлуатаційні властивості твердосплавного РІ значно залежать від мікрогеометрії РК, яка визначається величиною радіусу заокруглення та формою, що оцінюється величиною К-фактору. В значній мірі це пов'язано з тим, що твердий сплав крихкий матеріал, який чутливий до концентраторів та мікроконцентраторів напружень, що під час експлуатації є місцями імовірного зародження мікротріщин, що можуть призводити до руйнування і передчасної втрати ними пружності. Тому важливо на фінішних етапах їх виготовлення приділяти особливу увагу формуванню сприятливої мікрогеометрії РК та робочих поверхонь БНТП.

При MAO твердосплавних пластин на верстатах з великою кільцевою щілиною – типу "кільцева ванна" можливе формування рівномірного радіусу заокруглення РК з певною величиною К-фактору та видалення з їх поверхні мікроконцентраторів напружень. Але для цього необхідно визначити параметри MAO, які впливатимуть на отримання необхідних величин заокруглення РК та її форми та визначення часового фактору, що має критичне значення. Попередні аналітичні дослідження показують, що MAO дозволяє ефективно підвищувати якість поверхонь та РК БНТП, але дана гіпотеза потребує експериментальної перевірки.

3.1 Кінетика зміни радіусу заокруглення РК при MAO залежно від кута нахилу оправки р

Цикл експериментальних досліджень виконували на БНТП типу PNMM 110408 при швидкості обертання пластин навколо осі кільцевої ванни 200 та 300 об/хв, навколо власної осі – 350 об/хв. Обробка виконувалась з реверсом обертання при умові, що напрямок обертання пластин навколо осі кільцевої ванни та власної осі співпадали. Кут нахилу оправки відносно площини кільцевої ванни складав 10° , 24° та 42° . В якості МАП використовували ДЧК з розміром зерен 1000/630 мкм з додаванням алмазної пастки зернистістю 3/2 мкм. Обробку виконували поетапно, сумарний час обробки складав 4 хв. Після кожного етапу MAO (26 с) виконували

вимірювання радіусів заокруглення РК пластин в 12 – 16 перетинах за методикою описаною в розділі 3 та у [81].

Дослідження кінетики зміни величини радіусів заокруглення РК БНТП для різних кутів базування деталей в робочій зоні та швидкостей МАО показав, що перші 100 – 125 с процесу МАО відбувається монотонне близьке до лінійного притуплення РК (рисунок 3.1).

Швидкість притуплення кромок складає 0,11 – 0,12 мкм/с для зазначених умов МАО. Через 130 – 150 с після початку процесу МАО відбувається загострення – зменшення на 3 – 5 мкм величини радіусів заокруглення РК.

Подальша обробка більше 2,5 хв при швидкості обертання навколо осі кільцевої гвинти 200 об/хв призводить до збільшення радіусу заокруглення РК зі швидкістю 0,05 – 0,09 мкм/с, а при 300 об/хв зміна величини радіусів не проявляється та стабілізується на рівні 12 – 15 мкм. Подібне розходження в характері заокруглення РК пластин при різних швидкостях МАО пов'язано з особливостями формування / руйнування веретеноподібних ущільнених зон в МАІ та наявністю критичних швидкостей, при яких змінюється механізм перетворення МАІ при МАО [74].

3.2 Кінетика зміни радіусу заокруглення РК при MAO залежно від кута повороту оправки φ

Окрім кута нахилу оправки при обробці БНТП необхідно дослідити також кут повороту оправки φ , який теж має значний вплив на формування мікрогеометрії РК. Дослідження виконували на п'ятигранних твердосплавних пластинах типу РНММ 120408, виготовлених з твердого сплаву марки ВК8. У вихідному стані до MAO після спікання пластини були оброблені віброабразивним методом. На РК були присутні мікродефекти у вигляді мікроскопів, ширивів, про що свідчить величина $R_z = 16$ мкм. У зв'язку з низькою якістю поверхонь та РК пластин для виконання наступних досліджень було виконано додаткову обробку передньої та задньої поверхонь вздовж однієї з граней БНТП, а саме шліфування та полірування до величини $K_a = 0,07 - 0,08$ мкм, що дозволило сформузувати якісну РК та в подальшому виконувати вимірювання твердості поверхонь.

Процес обробки було розбито на 8 етапів по 26 с кожний – обертання БНТП здійснювалось з реверсом навколо осі кільцевої ванни та навколо осі оправки в одному напрямку за годинникову стрілку протягом 13 с та 13 с проти. Перед виконанням експерименту та після кожного етапу на пластинах вимірювали шорсткість на задніх поверхнях, поверхневу твердість та радіус заокруглення РК. Кут нахилу оправки відносно вертикальної осі складав $\rho = 24^\circ$, кут при якому процес обробки відбувається найбільш ефективно. Для отримання різного співвідношення нормальних та тангенціальних складових швидкості, що виникають при MAO по схемі, представленій на рисунку 2.1, кут φ повороту оправки відносно вертикальної осі змінювали дискретно $0^\circ, 20^\circ, 45^\circ$. Для віддільнення та кращого перемішування МАУ використовували відновлюючий стрижневий елемент (ВСЕ) [82], який був протилежно встановлений під кутом 45° до площини кільцевої ванни. В якості магнітно-абразивного матеріалу використовували суміш дробу чавунного колотого (ДЧК) з розміром зерен 400/315 мкм з алмазною пастою зернистістю 14/10 мкм, з додаванням ЗОТС марки АСФОЛ. Кутова швидкість обертання оправки навколо осі кільцевої ванни $\omega_B = 200$ об/хв (лінійна швидкість руху оправки вздовж кільцевої робочої зони – 2 м/с), кутова швидкість обертання оправки з закріпленою на ній

БНТП дорівнювала $\omega_0 = 300$ об/хв. Індукція магнітного поля в робочій зоні між полюсними наконечниками була рівною $B = 0,23$ Тл. На рисунку 4.2 представлена кінетика зміни величин радіусів заокруглення РК залежно від кута повороту оправки φ .

Показане стійке збільшення радіусу заокруглення РК в досліджуваних діапазонах умов MAO. Характер зміни радіусів, сформованих додатково необробленими поверхнями, при різних значеннях кута φ практично однаковий. Встановлено, що на всіх пластинах має місце зменшення радіусу через 70 – 90 с обробки, що може бути пов'язано зі зміною фізико-механічних властивостей поверхневого шару пластин – видаленням та зміною сталу дефектного поверхневого шару, сформованого на етапах попередньої обробки. Максимальні величини радіусів заокруглення РК формуються через 180 с обробки, при чому для умов максимального співвідношення тангенціальної до нормальної складової швидкості обробки ця величина максимальна. Характер зміни радіусу заокруглення РК вздовж додатково оброблених граней має аналогічний характер.

3.3 Вплив умов базування БНТП в робочій зоні верстату на формування величини радіусу та форми заокруглення РК

На характер формування заокруглення РК значний вплив мають параметри базування пластин в робочій зоні верстату, тому виконано експериментальне дослідження впливу даних умов на формування радіусу заокруглення РК для чотиригранних пластин типу SNMA 120408, виготовлених з твердого сплаву марки BK60M (ISO – K10).

БНТП обробляли 6 хв при наступних умовах: індукція магнітного поля в робочій зоні 0,25 Тл, магнітно-абразивний матеріал (МАМ) – суміш порошку Феромап зернистістю 200/100 мкм та алмазної пасту зернистістю 20/14 мкм [78]; кутова швидкість обертання оправки з пластиною навколо власної осі 400 об/хв (3 хв обертання оправки проти годинникової стрілки, 3 хв – за годинниковою стрілкою); швидкість руху пластини вздовж робочої зони 3 м/с (проти годинникової стрілки та за годинниковою стрілкою). Кут базування пластин в робочій зоні: кут нахилу осі оправки відносно вертикальної осі робочої зони $p = 45^\circ, 10^\circ$, кут повороту оправки відносно вертикальної осі $q = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Обробку виконували в режимі "натікання" та "натікання з оправки". В обох випадках МАІ діяв на передню поверхню в процесі MAO. Процес обробки виконували з ВСЕ $\varnothing 10$ мм оптимальної форми [83].

Отримані величини радіусів заокруглення РК представлені на рисунку 3.3. Доведено, що на радіус заокруглення РК впливає кут повороту оправки q навколо вертикальної осі та орієнтація БНТП відносно оправки. Так при збільшенні кута q від 0° до 45° при обробці в режимі "натікання з оправки" радіус заокруглення кромки збільшується. Найбільша величина радіусу заокруглення РК в даному випадку була отримана при $p = 45^\circ, q = 45^\circ$, та рівна 13,4 мкм на кромці та 38 мкм при вершині. При такому розташуванні пластин в робочій зоні верстату здійснюється активна взаємодія МАІ з РК та їх притуплення. Тобто, на формування радіусу округлення РК великий вплив має наявність тангенціальної складової швидкості обробки.

При $p = 10^\circ, q = 0^\circ$ отримано меншу величину радіусу заокруглення РК при вершині пластин та більшу на прямолінійній кромці, ніж в попередньому випадку.

При такому розташуванні пластин в робочій зоні МАІ легко огинає оправку і відбувається рівномірна обробка кромки та вершин.

При кутях $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ в режимі обробки "натікання" радіус заокруглення на прямолінійній кромці більший, а на кромці при вершині менший ніж при обробці при таких же параметрах базування пластин в робочій зоні, але при обробці в режимі "натікання з оправки". Це свідчить про вплив ущільненої зоми на формування МАІ та на його взаємодію з РК пластин. При відсутності оправки та обробці в режимі "натікання" МАІ стає більш округлим, що сприяє рівномірному формуванню заокруглених РК, а не переважно при вершині, як це відбувається при обробці в режимі "натікання з оправки", коли МАІ активно взаємодіє лише з кутами пластин.

При $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ обробка в режимі "натікання з оправки" радіуси округлення РК рівні 26,6 мкм при вершині та 13,2 мкм на прямолінійних кромках. При цьому активніше обробка буде проходити по задній поверхні пластин. При цьому не буде формуватись ущільнена зома МАІ, що сприяє активному видаленню матеріалу як на прямолінійних кромках, так і на кромках при вершинах БНПІ.

Різні величини радіусів заокруглення РК на різних ділянках пластин пояснюється наявністю ущільненої зони, яка погіршує умови руху МАІ відносно передньої поверхні БНТП, а також різними величинами нормальної та тангенціальної складових швидкості обробки, з якими МАІ взаємодіє з цими зонами.

Раніше відзначено, що суттєвим параметром, який забезпечує підвищення працездатності РІ, є К-фактор, характер зміни якого, при вказаних умовах МАО, представлено на рисунку 3.4. Експериментальні дослідження процесу МАО показали, що в умовах великих робочих щілин забезпечується формування не тільки заокруглення РК певної форми, а й керування величиною К-фактору.

Показано, що при обробці в режимі 'наткання з оправки' зі збільшенням кута q величина К-фактору зменшується, так при $q = 0^\circ$ вона рівна 1,75 на кромці та 1,5 при вершині, при $q = 25^\circ$ К-фактор рівний 1,5 та 1,45, при $q = 45^\circ$ він – 1,38 та 1,3 відповідно.

При $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$ обробки в режимі "натікання з оправки" К-фактор дорівнює 1,3 та 1,35.

При обробці в режимі "натікання" при $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ величина К-фактору максимальна та не співпадає з даними, отриманими при обробці в режимі "натікання з оправки" для тих же кутів базування пластин в кільцевій робочій зоні. Це свідчить про те, що наявність оправки впливає на взаємодію МАІ з передньою поверхнею, без неї порошок буде краще ковзати по поверхні, але з меншою силою. Оправка формує ущільнену зону, яка пригальмовує відносний рух МАІ та передньої поверхні БНТП в процесі обробки, що пояснює отримання меншої величини К-фактору при обробці в режимі "натікання з оправки" ніж при обробці в режимі "натікання" при інших рівних умовах обробки.

При $p = 45^\circ$, $q = 90^\circ$ обробки в режимі "натікання з оправки" отримано величину К-фактору 0,65 – 0,67, що менше 1. В даних умовах активніше проходить обробка задньої поверхні, а передня практично не обробляється і формується несприятлива форма заокруглення РК.

При МАО БНТП відбувається заокруглення РК, формується рівномірна РК без концентраторів напружень. Зовнішній вигляд РК до та після МАО на прямолінійній ділянці та при вершині пластин представлено на рисунку 3.5.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що при МАО БНТП відбувається приуплнення РК та формування необхідної величини К-фактора. Параметри базування пластин в робочій зоні верстату при МАО в режимі "натікання з оправки", для яких досягається найбільша величина радіусів заокруглення РК, дорівнюють $p = 45^\circ$, $q = 45^\circ$. Встановлено, що зі збільшенням кута q при обробці в режимі "натікання з оправки" величина К-фактору зменшується. Максимальна величина отримана при обробці в режимі "натікання" при $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ і рівна 1,68 на прямолінійній ділянці РК та 1,83 при вершині пластин. Визначено, що на формування К-фактору великий вплив має тангенціальна складова швидкості обробки. При МАО БНТП формується рівномірна РК без мікроконцентраторів напружень.

3.1 Вплив співвідношення технологічного часу і умов обробки в режимах «натікання», «стікання», «натікання з оправки» на формування величини радіусу та форми заокруглення РК БНТП

Забезпечення формування відповідної величини та форми РК БНТП реалізується при оптимальному розміщенні оброблюваних деталей в міжполюсному просторі та певним співвідношенням часу обробки в режимі "натікання" та в режимі "стікання" на установках з кільцевим розташуванням робочих зон. На процес MAO впливає орієнтація пластин відносно оправки. В процесі MAO БНТП може розташовуватись таким чином відносно оправки, що передня поверхня може орієнтуватись або до оправки, або протилежно їй. Обробку БНТП виконували в режимі "натікання", "стікання" та "натікання з оправки". У випадку обробки в режимі "стікання" передня поверхня пластин розташовувалась протилежно оправці, таким чином оправка не впливала на ущільнення МАІ поблизу цієї поверхні.

Для експериментальних досліджень було обрано п'ятигранні твердосплавні пластини без покриття типу FNMM 120408, матеріал – BK8. MAO виконували при швидкості руху БНТП вздовж кільцевої ванни – 3 м/с, швидкості обертання пластин навколо осі оправки 400 об/хв, індукції магнітного поля в робочій зоні – 0,25 Тл.

Обробку виконували із застосуванням суміші феромагнітних зерен (Феромап) з зернистістю 200/100 мкм та алмазної пасти зернистістю 3/2 мкм та 20/14 мкм [78]. На частину пластин після обробки було нанесено TiAlN покриття PVD методом. В таблиці 3.1 представлені інші параметри MAO, що варіювались при виконанні експериментальних досліджень, а саме: співвідношення часу обробки в режимі "натікання", "стікання" та "натікання з оправки"; кути ρ та φ базування пластин в робочій зоні верстату.

На першому етапі досліджено вплив розмірів частинок алмазної пасти, яка використовувалась для MAO, та послідовоче нанесення зносостійкого покриття на формування радіусів заокруглення РК та К-фактору. Стримані величини представлені на рисунку 3.6. MAO виконували при ідентичних параметрах, змінювали лише зернистість алмазної пасти: 3/2 мкм та 20/14 мкм, тривалість процесу дорівнювала 5 хв, всі інші умови MAO представлені в таблиці 3.1.

Визначено, що при використанні алмазної пасти з більшою зернистістю 20/14 мкм величини радіусів заокруглення РК отримані дещо більші і дорівнюють 35 – 36 мкм на прямолінійній РК та 45 – 47 мкм на РК, що знаходиться при вершинах БНТП, а для оброблених з використанням алмазної пасти зернистістю 3/2 мкм відповідно ці величини дорівнюють 33 – 34 мкм та 39 – 41 мкм (рисунок 3.6, а). Для пластин, на яких уже сформована РК, після нанесення зносостійкого покриття величина радіусу заокруглення практично не змінюється, а він лише збільшується для необроблених пластин, що може бути пов'язано з особливостями процесу фізичного осадження покриттів, адже спершу матеріал конденсується на найбільш виступаючих частинках поверхень, а РК цих пластин гострі з мікровиступами та мікроребрами.

Для таких пластин після покриття формується радіус заокруглення РК на прямолінійній кромці 11 – 18 мкм, а при вершинах 16 – 23 мкм.

Величина К-фактору (рисунок 3.6 б) у необроблених БНТП на всіх ділянках дорівнює 1. РК гостра, без сформованого радіусу заокруглення. Після нанесення зносостійкого покриття величина К-фактору збільшується як на прямолінійних ділянках РК, так і при вершинах пластин до величин 1,1 – 1,25 та 1 – 1,15 відповідно.

Таблиця 3.1 – Умови MAO БНТП

Час MAO	Співвідношення	МАП	Кути базування	Покриття	ВСЕ
Без MAO	-	-	-	-	-
Без MAO				TiAlN	-
5 хв	3 хв "натікання"+ 2 хв "стікання"	Феромап 200/100 мкм + АСМ 5/2 мкм	p=30°, q=25°	-	-
	3 хв "натікання"+ 2 хв "стікання"			TiAlN	-
	3 хв "натікання"+ 2 хв "стікання"	-		-	
10 хв	3 хв "натікання"+ 2 хв "стікання"	Феромап 200/100 мкм + АСМ 20/14 мкм	TiAlN	-	
	7 хв "натікання"+ 3 хв "стікання"		-	-	
	7 хв "натікання"+ 3 хв "стікання"		TiAlN	-	
	10 хв "натікання"		-	-	
	10 хв "стікання"		-	-	
10 хв "натікання з оправки"	-	-			
1,5 хв	1 хв "натікання"+ 0,5 хв "стікання"				
3 хв	3 хв "натікання з оправки"		p=45°, q=25°	-	Ø8мм 45°
5 хв	5 хв "натікання з оправки"				
3 хв	3 хв "натікання"				
5 хв	5 хв "натікання"				
5 хв	5 хв натікання	S330 (кульки 1200/900 мкм)	p=30°, q=25°	-	-

Очевидно це пов'язано з особливостями нанесення тонких зносостійких покриттів та з нерівномірним осадженням матеріалу на передню та задню поверхні БНТП поблизу гострої РК. Відзначимо, що величина радіусу заокруглення теж зростає. Після обробці МАМ з алмазною пастою зернистістю 20/14 мкм та 3/2 мкм величина К-фактору на прямолінійній РК зростає до величини 1,1 – 1,45 та 1,3 – 1,4 відповідно для більшої та меншої зернистості алмазної пасти, а при вершині практично не змінюється і знаходиться в межах 0,9–1,1. Отримання різних величин К-фактору на прямолінійній ділянці РК та при вершині пояснюється особливостями взаємодії МАІ з ними в процесі МАО, оскільки задня поверхня при вершині знаходиться на більшій відстані від осі обертання пластин навколо власної осі, що забезпечує рівномірну обробку передньої та задньої поверхонь, а прямолінійна ділянка РК більш активно оброблюється саме по передній поверхні. При цьому на величину К-фактору, як і для величин радіусів заокруглення РК, наявність покриття не має значного впливу і його величина практично не відрізняється від отриманих результатів для непокритих пластин.

На другому етапі досліджено вплив співвідношення технологічного часу обробки в режимі "натікання", "отікання" та "натікання з оправки" на величину радіусів заокруглення РК та К-фактору. На рисунку 3.7, а, б представлені отримані значення при обробці МАМ, що складається з порошку Феромап зернистістю 200/100 мкм та алмазної пасти з розміром зерен 20/14 мкм, інші параметри обробки представлені в таблиці 3.1.

Полтавський державний аграрний університет

Експериментально визначено, що при зазначених умовах базування БНТП в робочій зоні протягом 3 хв обробки в режимі "натікання" та 2 хв в режимі "стікання" величини радіусів заокруглення РК будуть дорівнювати 35 – 36 мкм на прямокутній РК та 45 – 47 мкм на РК при вершинах пластин, що менше ніж при обробці в співвідношенні 7 хв "натікання" та 3 хв "стікання". Таким чином, доведено, що зі збільшенням часу обробки величини заокруглення збільшуються, при цьому дача зміна не має лінійного характеру. При обробці протягом 10 хв лише в режимі "натікання" ці величини будуть більшими на 4 – 5 мкм на гранях та на 8 – 10 мкм при вершинах БНТП. При обробці 10 хв тільки в умовах "стікання" величина радіусу заокруглення РК на грані дорівнює 26 – 28 мкм, а при вершині пластин 40 – 42 мкм, що значно менше за величину радіусу при обробці протягом 10 хв. Це відбувається тому, що за таких умов MAO на РК діють значно менші сили обробки. Найбільша величина радіусу заокруглення 50 – 60 мкм була отримана за 10 хв MAO в режимі "натікання з оправки", коли БНТП розташовувалась передньою поверхнею до оправки. Це пояснюється тим фактом, що при MAO оправка виконує специфічну

роль у процесі формування МАІ в зоні обробки, створюючи рухоми ушцілену зону на передній поверхні БНТП, яка призводить до підвищення нормальних і тангенціальних сил необхідних для інтенсифікації процесу обробки.

Визначено, що величина К-фактору (рисунок 3.7, б) при обробці 3 хв в режимі "натікання" + 2 хв в режимі "стікання" та 7 хв "натікання" + 3 хв "стікання" збільшується на прямолінійній РК до величини 1,1 – 1,45, а при вершині не значно зменшується до величини 0,9 – 1,1, майже, не залежить від часу MAO. При обробці 10 хв в режимі "натікання" на прямолінійній РК отримана найбільша величина К-фактору 2,3, а при вершині вона менша 0,8, що свідчить про різні умови взаємодії цих ділянок БНТП з МАІ в процесі MAO. В даному випадку передня поверхня прямолінійної РК активно взаємодіє з порошком, а при вершині задня. Це визначається траєкторією та швидкостями відносно руху цих ділянок з МАІ. Як і очікувалось, при обробці 10 хв лише в умовах "стікання" отримано значно менші 1 величини К-фактору, оскільки в даному випадку значно активніше обробляється задня поверхня, а передня знаходиться в тіньовій зоні, а обробка відбувається лише за рахунок швидкості обертання БНТП навколо власної осі, а враховуючи габарити пластин, ця швидкість дуже мала в порівнянні з лінійною швидкістю переміщення пластини вздовж кільцевої робочої зони. При обробці в режимі "натікання з оправки" при всіх ідентичних умовах в порівнянні з обробкою в режимі "натікання" на прямолінійній ділянці РК К-фактор отримано меншої величини, що дорівнює 1,6 – 2, а при вершині більшої – 1,2 – 1,4. Така зміна форми заокруглення може бути пояснена лише наявністю оправки безпосередньо біля оброблюваних поверхонь, яка зменшує відносну швидкість руху МАІ та передньої поверхні пластин, збільшуючи при цьому силу їх взаємодії в процесі обробки.

Експериментальні дослідження впливу співвідношення технологічного часу обробки в режимі "натікання", "стікання" та "натікання з оправки" на величину радіусу заокруглення РК показали, що в процесі MAO відбувається їх стійке збільшення причому величина заокруглення залежить саме від співвідношення часу обробки в різних режимах MAO та від орієнтації пластин відносно оправки. Встановлено, що при обробці в режимі "натікання", коли передня поверхня

пластини розташована до оправки за 10 хв МАО різальна кромка притуплюється до величини 50 – 60 мкм.

Встановлено, що при даних умовах обробки відбувається притуплення РК, формується рівномірна кромка без концентраторів напружень, її зовнішній вигляд на гранях та кутах БНТП представлено на рисунку 3.8.

Була доведена ефективність використання додаткових конструкційних елементів для відновлення форми та властивостей МАІ в процесі МАО [84]. Тому для обробки партії пластин використовували додатковий ВСЕ Ø8 мм, виготовлений з немагнітного матеріалу, який встановлювався під кутом 45° до площини кільцевої ванни, схема обробки представлена на рисунку 3.9.

На рисунку 3.10 представлені величини радіусів заокруглення РК та К-фактору при обробці порошком Феромап з розміром зерен 200/100 мкм та алмазної пасти зернистістю 20/14 мкм при кутах базування пластин $\rho = 45^\circ$ та $\varphi = 25^\circ$ при різному співвідношенні обробки в режимі "натікання", "стікання" та "натікання з оправки" з використанням ВСЕ.

Експериментально визначено, що при даних умовах обробки збільшення часу МАО веде до збільшення величини радіусів заокруглення РК. При обробці в режимі "натікання з оправки" за 3 хв формується радіус величиною 20 – 26 мкм на прямолінійній ділянці та 36 – 42 при вершині, а за 5 хв відповідно 30 – 36 мкм та 56 – 62 мкм.

При аналогічних умовах обробки, але для режиму "натікання" ці величини отримані менші, для 3 хв на прямолінійній РК 21 – 24 мкм, при вершині 27 – 34 мкм, для 5 хв відповідно 25 – 32 мкм та 30 – 37 мкм, що ще раз доводить вплив оправки на ущільнення МАІ при обробці в режимі "натікання з оправки". А величина радіусів при вершинах даних пластин, аналогічно до попередніх досліджень, більша, ніж на прямолінійних ділянках, що пояснюється різною швидкістю обробки цих ділянок та наявністю поблизу полюсних наконечників "мертвих зон" з МАІ, який малорухомий та є більш ущільненим. При комбінованій обробці протягом 1 хв в режимі "натікання" та 0,5 хв в режимі "стікання" отримано радіуси заокруглення РК на прямолінійній ділянці величиною 20 – 24 мкм, при вершині 26 – 29 мкм, що є найменшими величинами серед розглянутих режимів та співвідносяться з радіусами отриманими за 3 хв обробки в режимі "натікання". Це свідчить про чіткішу кінетику зміни величини радіусу заокруглення РК.

3.5 Кінетика зміни величини радіусів заокруглення РК від складу МАІ

Ефективний процес MAO виробів з твердих сплавів реалізується при використанні МАІ, сформованого з сумішей, які складаються з феромагнітного порошку та добавок алмазної пасти. Наведені рекомендації щодо вибору зернистості алмазної пасти [78] відносяться в основному до проблеми забезпечення відповідної продуктивності і мінімальної шорсткості оброблюваних виробів. Проте вплив вказаних характеристик на процес формування мікрогеометрії РК БНТП не досліджувався, особливо при формуванні радіусів заокруглення.

Виконано аналіз впливу розмірів частинок порошкових матеріалів, з яких формується МАІ на кінетику зміни величини заокруглення РК при MAO в великих магнітних щілинах кільцевого типу. Для експериментальних досліджень використовували пластинки без покриття типу SEAN 1203AFTN-M14-K фірми SECO, виготовлені з кермету марки НХ. Процес обробки був розділений на 4 етапи по 2 хв кожен. При цьому одну хвилину пластина оберталась за годинниковою стрілкою навколо осі оправки, а другу – проти годинникової стрілки, обертання навколо осі кільцевої ванни було обрано, таким чином щоб переважно

оброблювалась передня поверхня. Використовували ВСФ, який розташовувався в тому ж напрямку, що і оправка з пластиною, під кутом 60° до площини кільцевої ванни. Кути базування пластин рівні: $\rho = 40^\circ$, $\sigma = 10^\circ$. Індукція магнітного поля в робочій зоні – 0,23 Тл. При MAO для формування МАІ використовували дві суміші ДЧК (розмір зерен 400/315 мкм, зерна рівновісні) з алмазною пастою зернистістю 14/10 мкм та суміш ДЧК (розмір зерен 200/100 мкм, зерна рівновісні) з алмазною пастою зернистістю 3/2+2/1 мкм.

На рисунку 3.11 представлена кінетика зміни радіусів за заокруглення РК залежно від часу MAO при використанні МАІ різного складу.

Показано, що радіуси заокруглення РК при MAO збільшуються. При використанні ДЧК 400/315 мкм з алмазною пастою 14/10 мкм, на початковому етапі обробки має місце більш активне заокруглення кромки, ніж при використанні дрібного МАІ, а через 300 – 360 с обробки інтенсивність заокруглення знижується, у той час, як дрібний МАІ забезпечує рівномірне притуплення кромки з однаковою швидкістю. Це пояснюється тим, що при меншій величині алмазних зерен має місце велика їх концентрація на поверхні магнітного наповнювача і процес обробки йде більш активно та стабільно, забезпечуючи рівномірну обробку.

Після обробки по всій довжині кромки формується практично однакова величина радіусу заокруглення (рисунок 3.12).

В результаті МАО з робочих поверхонь БНТД та РК видаляється мікронерівності характерні для процесу шліфування (рисунок 3.13).

3.6 Вплив додаткового немагнітного зрижневого елемента на формування радіусів заокруглення РК та К-фактору

Раніше було показано, що при обробці в режимі "натікання з оправки", поблизу передньої поверхні утворюється квазіущільнена зона, яка призводить до підвищення нормальних і тангенціальних складових швидкості, що забезпечує інтенсифікацію процесу обробки. При обробці в режимі "натікання", коли МАІ рухається з протилежної від оправки сторони, такої зони не утворюється і процес обробки відбувається менш інтенсивно. Таким чином при обробці двосторонніх

твердосплавних пластин при MAO потрібна зміна орієнтації пластин відносно оправки. Для забезпечення можливості процесу MAO без переустановлення БНТП доцільним є використання додаткового стрижневого елемента, що імітує оправку і закріплюється з протилежної від оправки сторони БНТП. Таким чином можливо виключити операцію зміни орієнтації пластин відносно оправки, замінивши її лише на зміну напрямку обертання оправки з БНТП відносно осі кільцевої робочої зони. При обертанні в одному напрямку роль ущільнюючого елемента буде виконувати оправка, а при зміні напрямку – додатковий стрижневий елемент.

В дослідженнях MAO в умовах великих робочих щілин кільцевого типу було використано двосторонні пластини без стружколомаючих качавок типу PNMA-110408, марка твердого сплаву – BK8. У вихідному стані РК гостра з концентраторами напружень, які під час експлуатації є місцями імовірного зародження мікротріщин, що можуть призводити до руйнування і передчасної втрати працездатності інструментом. Радіус заокруглення РК при вершинах складав $9 - 14$ мкм, на прямолинійній РК – $10 - 14$ мкм, величина K-фактору дорівнювала $0,98 - 1$.

Обробку БНТП виконували при швидкості руху БНТП вздовж кільцевої ванни 3 м/с (рух за- та проти годинникової стрілки), при кутовій швидкості обертання пластин навколо осі оправки – 250 об/хв (обертання з реверсом), при куті нахилу оправки по відношенню до осі кільцевої робочої зони $p - 40^\circ$ та куті повороту відносно дотичної площини до робочої зони $q - 18,5^\circ$. Індукція магнітного поля в робочій зоні дорівнювала $0,25$ Тл у пільній від МАП щілині. Час обробки – 6 хв, 3 хв в режимі "натікання" та 3 хв в режимі "натікання з оправки". Пластини обробляли МАП, який представляє собою суміш порошку Феромап зернистістю $200/100$ мкм та алмазної пасти зернистістю $28/14$ мкм. Обробку виконували з відновлюючим формою та властивості МАІ в процесі MAO немагнітним елементом $\varnothing 10$ мм оптимальної форми [83].

Для покращення процесу обробки в режимі "натікання" було використано долаксвий стрижневий елемент, який в процесі обробки виконував роль ущільнюючого МАІ елемента аналогічного по дії оправці при обробці в режимі "натікання з оправки", коли порошок рухається зі сторони оправки. Довжина

додаткового елемента складала 28 мм, і була достатньою для того, щоб нижня його частина розташовувалася в процесі МАО за межами сформованого МАІ в нижній частині робочої зони. В процесі МАО пластина розташовується в центральній частині робочої зони висотою 30 мм. Для того щоб додатковий стрижневий елемент не впливав на розподіл магнітної індукції в робочій зоні і не погіршував кінематику відносного руху МАІ та оброблюваних поверхонь його було виготовлено з немагнітного матеріалу. Схема МАО БНТП в робочій зоні верстату типу "кільцева ванна" представлена на рисунку 3.14.

Стримані після МАО величини радіусів заокруглення РК та І-факторів при обробці з додатковим стрижневим елементом представлені на рисунку 3.15.

Визначено, що відбулось пригуплення РК, зникли мікроконцентратори напружень, сформувався радіус заокруглення, величина якого дорівнює на РК при вершині зі сторони оправки 24 – 27 мкм, на прямолінійній кромці – 19 – 21 мкм. На РК при вершині зі сторони додаткового стрижневого елемента 27 – 30 мкм, на прямолінійній кромці – 20 – 23 мкм. Величини К-фактору було отримано такі: зі сторони оправки на РК при вершині – 0,67 – 0,77, на прямолінійній РК – 0,98 – 1,05, зі сторони стрижневого елемента на кромці при вершині – 0,9 – 0,95, на прямолінійній РК – 1,2 – 1,3. Величини радіусів заокруглення та К-фактору зі сторони стрижневого елемента отримано вищі, ніж зі сторони оправки, що залежить від характеру взаємодії МАІ з даними кромками в процесі обробки.

Як і для попередніх досліджень, після МАО величина К-фактору при вершинах менша, а радіусів заокруглення РК більша, ніж на прямолінійних РК, що пов'язано з особливостями взаємодії задніх поверхонь при вершинах БНТП з малорухомими та ущільненими "мертвими" зонами поблизу полюсних наконечників, різницею в сумарних швидкостях обробки на даних ділянках, а також причиною може бути неоднорідна вихідна якість задньої та передньої поверхонь, адже задня поверхня була піддана віброабразивній обробці, а передня поверхня була шліфованою.

3D зображення РК до та після MAO зі сторони оправки та стрижневого елемента при вершинах та прямолінійних частинах РК БНТІ наведено на рисунку 3.16.

Дане зображення було отримано при вимірюванні радіусів заокруглення РК та величин К-фактору на оптичному приладі MikroCAD. В результаті MAO відбулось притуплення РК, сформовано рівномірний радіус заокруглення РК, зникли мікроконцентратори напружень та вигладжено мікрорельєф робочих поверхонь, на перетині яких утворюється РК.

Зазначимо, що в промисловості широко використовуються БНТІ без стружколомаючих канавок, при їх переточуванні по передній поверхні можливо

відновити їх працездатність, але при такій схемі переточування отримана РК буде гострою з великою кількістю виступів та впадин. Через це стійкість переточеного інструменту нижча стійкості нового.

3.7 Формування РК на БНТП з попередньо виконаною фаскою

В окремих випадках для утворення спеціальної форми РК виконують шліфування мікрофаски або навіть роблять мікрогранку [85], що дозволяє попередньо задавати необхідну форму кромки. Метод MAO не дозволяє формувати радіуси заокруглення надто великих розмірів. Але є перспективним при попередньому виконанні мікрогранки для будь-якої форми та величини радіусу заокруглення та подальшому виконанні MAO для формування рівномірного радіусу заокруглення РК. Тому важливим є дослідження впливу MAO на формування РК на БНТП на яких попередньо виконано мікрофаску.

При експериментальних дослідженнях використали твердосплавні пластини без покриття типу SNMM 120412, виготовлені з твердого сплаву ISO K30, M30-M40. БНТП обробляли 6 хв в режимі "натікання з оправки" при наступних умовах: індукція магнітного поля в робочій зоні 0,25 Тл; MAM – суміш ДЧК зернистістю 400/3-5 мкм та алмазної пастки зернистістю 14/10 мкм; кутова швидкість обертання оправки з пластиною навколо власної осі 400 об/хв (3 хв обертання оправки проти годинникової стрілки, 3 хв – за годинниковою стрілкою); швидкість руху пластини вздовж робочої зони 3 м/с; $\rho = 45^\circ$, $\varphi = 20^\circ$. Процес MAO виконували з ВСЕ $\varnothing 10$ мм.

Показано, що при MAO відбувається формування рівномірного радіусу заокруглення РК без огранки і фаски, при чому не змінюється її форма, величина K-фактору до обробки та після MAO практично рівна 1 як на прямолінійній, так і на РК при вершині. Форма та 3D зображення кромки без MAO та після обробки зображені на рисунку 3.17. В результаті обробки величина радіусів заокруглення РК збільшується з 41 – 44 мкм до 50 – 56 мкм на прямолінійній РК та на РК при вершинах БНТП.

Висновки до розділу 3

1. Дослідження кінетики зміни радіусів заокруглення РК БНТП при MAO в умовах великих робочих щілин показали, що в процесі обробки протягом 3 хв відбувається гетерогенна зміна величини РК, вони притуплюються до величини 40 – 45 мкм при вихідних значеннях 25 – 30 мкм.

2. Доведено, що на ефективність MAO суттєвий вплив мають величини та співвідношення тангенціальної та нормальної складових швидкостей, виникаючих при MAO в умовах обробки на верстатах з великою кільцевою робочою зоною, що підтверджує результати розрахунків і моделювання. Варіювання кутами базування пластин в робочій зоні дозволяє керувати характеристиками процесу MAO за рахунок зміни співвідношення цих складових швидкостей обробки.

3. Доведена можливість прогнозування процесу MAO та отримання необхідних параметрів РК, що підтверджено експериментальними дослідженнями. Для

ефективного видалення матеріалу необхідне певне співвідношення величин IV_{τ}/IV_{η} . Для даних умов MAO воно відповідає величині близькій до 1,5.

4. Величина K-фактору при даних умовах обробки для всіх пластин знаходиться в межах 1,4 – 1,6. Як і в попередніх дослідженнях вона на прямолінійній кромці дещо більша, що, як і для отриманих величин радіусів, відбувається за рахунок наявності "мертвих зон" та різної швидкості відносного руху MAI та даних ділянок БНТП. При обробці протягом 1 хв в режимі "натікання" та 0,5 хв в режимі "стікання" отримано величину K-фактору однаковою на всіх ділянках РК і рівну 1,15 – 1,25, яка найменша серед усіх, оскільки при такому співвідношенні зменшується негативний вплив "мертвих" зон [86], адже при 0,5 хв обробки в режимі "стікання" передня поверхня знаходиться в тіньовій зоні, що приводить до значного зниження інтенсивності її обробки і таким чином кути на передній поверхні практично при цьому не оброблюються.

5. Встановлено, що найбільш ефективно MAO, в даних умовах, виконується при використанні для формування MAI суміші ДЧК зернистістю 200/100 мкм з алмазною пастою зернистістю 3/2+2/1 мкм.

6. Використання MAO після переточування пластин дозволяє відновити їх працездатність та сформувати необхідну мікрогеометрію РК та робочих поверхонь БНТП.

7. Таким чином, показано, що MAO дозволяє формувати РК, на яких попередньо виконані мікрофаски, не змінюючи при цьому величини K-фактору, а видаляти лише огранку, формуючи рівномірну та гладку РК з попередньо заданою формою.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека в інструментальних цехах підприємств машинобудування

Охорона праці в інструментальних цехах машинобудівних підприємств є сукупністю організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та правових заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці працівників, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань. Особливості виробничого процесу в інструментальних цехах, пов'язані з виготовленням та ремонтом технологічного оснащення, ріжучого та вимірювального інструменту, вимагають особливої уваги до питань безпеки праці.

Відповідно до законодавства України, всі роботодавці зобов'язані забезпечувати безпечні умови праці та дотримуватися вимог охорони праці, державними стандартами системи охорони праці, санітарними правилами та нормами, а також галузевими нормативами. В інструментальних цехах до роботи допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли обов'язковий медичний огляд та навчання безпечним методам та прийомам виконання робіт.

Робочі місця в інструментальних цехах мають бути спроектовані та обладнані відповідно до ергономічних вимог, що забезпечує не тільки підвищення продуктивності праці, а й зниження ризику травматизму. Верстати та обладнання повинні бути оснащені захисними пристроями, огорожами частин, що рухаються, аварійними вимикачами та блокуваннями. Усе електроустаткування підлягає обов'язковому заземленню та періодичним перевіркам на відповідність вимогам електробезпеки.

Ширина проходів між верстатами та робочими місцями має становити не менше 0,7–1,0 м, а основні проходи – не менше 1,5 м. Робочі місця необхідно утримувати в чистоті та порядку, регулярно видаляти стружку та відходи виробництва. Освітлення робочих зон має відповідати нормам, забезпечуючи достатній рівень освітленості без відблисків та тіней.

Операції з обробки металів на токарних, фрезерних, свердлильних та шліфувальних верстатах є однією з найбільш травмонебезпечних сфер

інструментального виробництва. Перед початком роботи оператор зобов'язаний перевірити справність верстата, наявність та стан захисних пристроїв. Усі регульовальні та ремонтні операції повинні проводитися тільки при повній зупинці обладнання та відключенні його від мережі.

Забороняється працювати без засобів індивідуального захисту, зокрема без захисних окулярів при шліфуванні. При обробці заготовок необхідно надійно закріплювати їх у пристосуваннях, уникаючи роботи з інструментом із тріщинами, задирками та іншими дефектами. Робочий одяг повинен бути щільно застебнутий і не мати частин, що звисають, які можуть бути захоплені рухомими елементами верстата.

Ефективна система охорони праці неможлива без проведення організаційних заходів. Усі працівники інструментального цеху повинні проходити вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктаж з охорони праці. Періодичність повторного інструктажу встановлюється не рідше одного разу на шість місяців. Результати інструктажів фіксуються у журналах встановленої форми.

Важливу ролі відіграє навчання та перевірка знань вимог охорони праці. Працівники, які не пройшли перевірку знань, до виконання робіт не допускаються. Крім того, обов'язковим є проведення попередніх та періодичних медичних оглядів для виявлення протипоказань до виконання робіт підвищеної небезпеки.

Працівники інструментальних цехів забезпечуються засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) залежно від характеру виконуваних робіт. До таких засобів належать спецодяг, захисні окуляри, рукавички, каски, захисне взуття та інші засоби. ЗІЗ повинні відповідати вимогам та мати сертифікати відповідності. Роботодавець зобов'язаний не лише видавати ЗІЗ, а й контролювати їх використання та справність.

Контроль за станом охорони праці здійснюється службою охорони праці підприємства разом із керівниками підрозділів. Проводяться планові та позапланові перевірки стану робочих місць, технічного стану обладнання, наявності та стану ЗІЗ, ведення документації з охорони праці. За результатами перевірок складаються акти та розробляються заходи щодо усунення виявлених порушень.

Відповідальність за дотримання вимог охорони праці несуть як роботодавці так і працівники. Роботодавець зобов'язаний створити безпечні умови праці,

забезпечити навчання персоналу та забезпечення необхідними засобами захисту. Працівники, у свою чергу, зобов'язані дотримуватись встановлених правил та інструкцій, правильно застосовувати ЗІЗ та повідомляти про несправності обладнання або порушення правил безпеки.

Отже, охорона праці в інструментальних цехах машинобудівних підприємств є невід'ємною частиною виробничого процесу та найважливішим фактором забезпечення сталої та ефективної роботи. Виконання комплексу організаційних, технічних та профілактичних заходів дозволяє значно знизити рівень травматизму, підвищити культуру виробництва та зберегти здоров'я працівників. Системний підхід до питань безпеки праці сприяє не лише дотриманню вимог законодавства, а й підвищенню конкурентоспроможності підприємства загалом.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Магнітно-абразивна обробка (МАО) передбачає абразивне видалення припуску в присутності магнітного поля при відносному переміщенні абразивних зерен і оброблюваної поверхні. Проводити таку обробку можна із застосуванням різних абразивних інструментів: суспензій, магнітно-абразивних порошків. Найбільшого поширення набули схеми процесу з магнітно-абразивними порошками, які і ототожнюються з терміном «магнітно-абразивна обробка».

Найбільш поширеною сферою застосування МАО є зниження шорсткості оброблюваних поверхонь з одночасним підвищенням їх якісних характеристик. Суть методу: магнітно-абразивний порошок розташовується між полюсами електромагнітів, створюючи ріжучий інструмент, щільність якого можна варіювати, змінюючи напруженість магнітного поля.

При русі деталі через робочу зону порошок надає тиск на деталь в кожній точці поверхні, що призводить до знімання металу і згладжування мікронерівностей.

Особливостями є: можливість нівелювання абразивних зерен щодо оброблюваної поверхні; залобігання перевантаження зерен і появи спалахів миттєвої температури; відсутність тертя зв'язки з матеріалом деталі; відсутність причин, що викликають зміну структури матеріалу в локальних зонах оброблюваної

поверхні і різке зменшення, в порівнянні зі шліфуванням зцементованим зерном, загальної температури різання. Силовий вплив зерен порошку на оброблювану поверхню в умовах багаторазового просторового перемагнічування деталі при обробці викликає зміцнення її поверхневого шару, дроблення елементів кристалічної решітки з утворенням більш дрібнодисперсної фази та зниження залишкових напружень розтягу з переміщенням їх в стискує її.

Економічний ефект від впровадження MAO у нашому випадку буде зумовлений зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення БТНП.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (4.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 1$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 200000$ грн.

Економія від зменшення собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення вузлів кріплення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 1650000 = 165000 \text{ грн./ т,}$$

де 1650000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час MAO:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,
 $\Delta Ц' = 1000$ грн. / т ;

$$\Delta Ц = 1000 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (165000 + 1000) \cdot 1 - (8,15 + 0,1) \cdot 200000 = 116000 \text{ (грн.)}$$

Отже, економічний ефект від впровадження магнітно-абразивної обробки під час виготовлення БТНП склав 116000 грн. на рік.

4.3 Екологічні аспекти діяльності підприємств сільськогосподарського машинобудування

Екологічні аспекти діяльності підприємств сільськогосподарського машинобудування відіграють важливу роль у забезпеченні сталого розвитку агропромислового комплексу та збереженні природного середовища. Виробництво сільськогосподарської техніки супроводжується використанням значних обсягів сировини, енергії, води та хімічних речовин, що потенційно може негативно впливати на навколишнє середовище. Тому впровадження екологічно безпечних технологій та ефективних природоохоронних заходів є природним.

До найбільш суттєвих екологічних проблем підприємств сільськогосподарського машинобудування відносяться: викиди забруднюючих речовин в атмосферу, скидання стічних вод, утворення промислових відходів, забруднення ґрунтів і водойм, а також високий рівень енергоспоживання та використання природних ресурсів. Основними джерелами негативного впливу є ливарні, зварювальні, фарбувальні, термічні, механічні та механоскладальні ділянки, де застосовуються хімічні матеріали, високі температури та енерговитратні процеси.

Атмосферні викиди включають оксиди азоту, вуглецю, сірки, дрібнодисперсний пил, пари розчинників та лакофарбових матеріалів. Вони утворюються при плавленні металів, зварюванні, різанні, термообробці та фарбуванні виробів. Стічні води містять залишки оливо, емульсій, миючих засобів та хімічних реагентів, які можуть потрапити у водойми без відповідного очищення. Промислові відходи, включаючи металеву стружку, шліпки, зношені фільтри та пакувальні матеріали, потребують безпечної утилізації чи переробки.

Сучасні підприємства сільськогосподарського машинобудування впроваджують системи екологічного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 14001. Це дозволяє систематизувати роботу з охорони навколишнього середовища, контролювати вплив виробництва на природу та постійно покращувати екологічні показники. Система екологічного менеджменту включає моніторинг викидів водоспоживання, утворення відходів, розробку планів щодо їх скорочення та проведення регулярних екологічних аудитів для оцінки ефективності заходів і забезпечення відповідності екологічним стандартам та законодавчим вимогам.

Одним із найважливіших напрямів є модернізація технологічного обладнання та впровадження маловідходних та безвідходних технологій. Наприклад, застосування сучасних фарбувальних камер із системою рециркуляції повітря та уловлювання розчинників дозволяє значно скоротити викиди летких органічних сполук. Використання замкнених водоборотних систем знижує обсяг скидання стічних вод та заощаджує водні ресурси. Впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами підвищує енергоефективність.

Рациональне поводження з відходами є одним із ключових напрямів екологічної політики підприємств машинобудування. Металева стружка, що утворюється при механічній обробці деталей, спрямовується на переплавлення та повторне використання. Відпрацьовані оливи та емульсії зазнають регенерації або передаються спеціалізованим організаціям для утилізації. Пластмасові та полімерні відходи сортуються та переробляються на нові матеріали.

Важливе значення має організація роздільного збору відходів та їх тимчасового зберігання на спеціально обладнаних майданчиках, що виключають можливість

забруднення ґрунту та ґрунтових вод. Для зменшення обсягів поховання відходів підприємства впроваджують технології пресування, брикетування та переробки матеріалів у виробничий цикл.

Зниження енерговитрат та раціональне використання природних ресурсів є не лише екологічними, а й економічними завданнями підприємств сільськогосподарського машинобудування. Заходи у цій галузі включають модернізацію систем опалення та освітлення, застосування енергоефективних електродвигунів та перетворювачів частоти, оптимізацію режимів роботи обладнання. Все це дозволяє скоротити викиди парникових газів та зменшити вуглецевий слід підприємства.

Раціональне використання води забезпечується рахунок впровадження замкнених циклів водопостачання, повторного використання промивних вод та оптимізації процесів миття та охолодження. Крім того, проводиться облік та контроль споживання ресурсів, що сприяє їх більш економічному використанню.

Розвиток сільськогосподарського машинобудування за умов початку «зеленої» економіки вимагає подальшого вдосконалення природоохоронної діяльності. Одним із перспективних напрямів є впровадження принципів найкращих доступних технологій (НДТ), які дозволяють знижувати негативний вплив на навколишнє середовище без шкоди для продуктивності. Також розвивається концепція «замкнутого циклу» виробництва, що передбачає повторне використання ресурсів, вторинну переробку матеріалів та мінімізацію утворення відходів на всіх етапах життєвого циклу продукції.

Важливим напрямом є цифровізація та впровадження систем моніторингу екологічних показників у режимі реального часу. Це дозволяє оперативно виявляти та усувати джерела забруднень, а також формувати екологічну звітність відповідно до вимог законодавства.

Отже, екологічні аспекти діяльності підприємств сільськогосподарського машинобудування мають стратегічне значення для сталого розвитку галузі та збереження природного середовища. Реалізація комплексу природоохоронних заходів, впровадження екологічного менеджменту, модернізація виробничих процесів та раціональне використання ресурсів дозволяють суттєво знизити

негативний вплив виробництва на довкілля. У перспективі саме екологізація машинобудування стане одним із ключових факторів.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто особливості безпеки праці в інструментальних цехах підприємств машинобудівної галузі.

2. Економічний ефект від впровадження магнітно-абразивної обробки під час виготовлення БТНП склав 116000 грн. на рік.

3. Розглянуто екологічні аспекти діяльності підприємств сільськогосподарського машинобудування.

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. Виконано аналіз фінішних методів обробки твердосплавного РІ, що забезпечують формування показників його якості та працездатності БНП. Магнітно-абразивна обробка дозволяє коригувати радіус та форму заокруглення різальної кромки твердосплавних пластин.

2 Розроблена методика досліджень, що включала вибір БНП, магнітно-абразивних матеріалів, засобів вимірювання, а також опис експериментальної установки для МАО.

3 Встановлено основні закономірності впливу кінематичних параметрів процесу, співвідношення технологічного часу обробки в режимі «натікання», «стікання» та «натікання з оправки» та орієнтації пластин відносно оправки на величину та форму заокруглення РК. Визначено, що при обробці в режимі «натікання з оправки» за 10 хв МАО можливо сформувати рівномірну РК з величиною 50–60 мкм та К-фактором на прямолінійній ділянці РК 1,6 – 2, а при вершині – 1,2...1,4. Показано, що МАО забезпечує формування РК, на яких попередньо виконано мікрофаску, не змінюючи її форму. При цьому видаляється лише огранка та формується рівномірна та гладка поверхня. Доведена ефективність використання додаткового немагнітного стрижневого елемента на підвищення інтенсивності МАО, що відбувається за рахунок його впливу на характеристики МАІ, що зумовлює підвищення сил обробки, які забезпечують ефективну обробку двосторонніх пластин як в режимі «натікання», так і в режимі «натікання з оправки».

4. Забезпечення охорони праці в інструментальних цехах машинобудівних підприємств є важливою складовою виробничого процесу. Застосування організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та правових заходів дозволяє суттєво знизити рівень виробничого травматизму, підвищити культуру виробництва та зберегти здоров'я працівників. Дотримання вимог законодавства, правильна організація робочих місць, використання засобів індивідуального захисту та регулярне навчання персоналу забезпечують безпечні умови праці та стабільну

роботу підприємства. Впровадження технології магнітно-абразивної обробки (МАО) при виготовленні деталей забезпечує значний економічний ефект за рахунок зниження трудомісткості, зменшення собівартості продукції та підвищення її якості. У цьому випадку річний економічний ефект становив 116000 грн, що підтверджує доцільність застосування цієї технології у виробництві. Екологічні аспекти діяльності підприємств сільськогосподарського машинобудування відіграють стратегічну роль у забезпеченні сталого розвитку галузі. Впровадження систем екологічного менеджменту, модернізація технологічного обладнання, використання безвідходних технологій, раціональне поводження з відходами та ресурсами дозволяють суттєво зменшити негативний вплив виробництва на довкілля. За умов переходу до «зеленої» економіки екологізація виробничих процесів стає одним із ключових факторів конкурентоспроможності підприємств.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Барановський В. М. Технологія машинобудування. Київ: Либідь 2020. 432 с.
2. Бакуль В. Н. Справочник по алмазної обробці металорежущого інструмента. Київ: Техніка 1971. 208 с.
3. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal Cutting Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press 2021. 864 p.
4. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Київ: Наукова думка 1984. 328 с.
5. Лошак М. Г. Упрочнение твердых сплавов. Київ: Наукова думка 1977. 148с.
6. Rech J. Cutting edge preparation and surface issues. International Conference Smart solutions for metal cutting. HSS Forum. Aachen 2005. P. 1–12.
7. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH 2009. 193 p.
8. Tenshoff H. K., Karpuschewski B., Mohlfeld A., Seegers H. Influence of subsurface properties on the adhesion strength of sputtered hard coatings. Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 116. P. 524–529.
9. Denkena B., Köhler J., Ventura C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. Precision Engineering. 2013. Vol. 37 (3). P. 590–598.
10. Koehler W. Analysis of the High Performance Drilling Process: Influence of Shape and Profile of the Cutting Edge of Twist Drills. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the ASME. 2008. Vol. 130 (5). P. 1–7.
11. Захаренко М. П., Савченко Ю. Я. Алмазно-электролитическая обработка инструмента. Київ: Наукова думка 1977. 223 с.
12. Biermann D., Abmuth R., Wolf M., Kipp M. Der letzte Schliff formt die Mikrogestalt – Neue Potenziale in der Schneidkantenpräparation mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik. 2013. Vol. 26 (2). P. 76–83.

13. Brodbeck J., Rothenaicher S., Biermann D., Heymann T., Wolf M. Drillpolishen als neuartiges Kantenpräparationsverfahren – Mit elastisch gebundenen Scheiben die Kanten verrunden. WB Werkstatt und Betrieb. 2014. Vol. 147 (1/2). P. 84–87.

14. Герасименко О. В. Магнітно-абразивна обробка деталей машин монографія. Харків ХНАДУ 2018. 312 с.

15. Гах В. М., Пальцев В. А., Гах И. О. Эффективность применения различных технологий виброабразивной обработки твердосплавного инструмента. Вісрації в техніці та технологіях всеукраїнський науково-технічний журнал. Вінниця 2009. № 4 (56). С. 75–81.

16. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Київ Техника 1989. 177 с.

17. ДСТУ 2226:2018. Охорона праці. Загальні вимоги. Київ Мінекономрозвитку України 2018. 48 с.

18. Kennedy D. M., Vahey J., Hanney D. Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing. Materials & Design. 2005. Vol. 26 (3). P. 203–208.

19. Biermann D., Wolf M., Asmuth R. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. Procedia 5th CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012. Vol. 1. P. 172–177.

20. Cortés Rodríguez C. J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Kassel Kassel University Press GmbH 2009. 189 p.

21. Бейлиязев О. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung Phd-Thesis. Magdeburg Otto von Guericke 2003. 150 p.

22. Denkena B., de Leon L., Bassett E., Rehe M. Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing. Key Engineering Materials. The Coatings in Manufacturing Engineering. Erlangen Germany April 14–15 2010. Vol. 438. P. 1–7.

23. Bassett E., Köhler J., Denkena B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2012. Vol. 5. P. 108–126.

24. Denkena B., Leon L., Bassett E. Preparation of Designed Cutting Edge Microgeometries by Simultaneous 5-Axes Brushing. Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN) and EUREKA Brokerage Event. Kallithea of Chalkidiki Greece 1–3 October 2008. P. 117–123.

25. Зозуля В. І. Основи різання металів та інструмент. Київ Вища школа 2017. 356 с.

26. Priarone P. C., Rizzuti S., Settineri L., Vergnano G. Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide. Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212 (12). P. 2619–2628.

27. Risse K. Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl. Aachen Shaker Verlag 2006. 151 p.

28. Іванченко М. П., Чухліб Є. П. Методи підвищення зносостійкості інструменту. Львів Видавництво ЛНТУ 2019. 284 с.

29. Biermann D., Wolf M., Heymann T. Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen. Wissenschaft & Forschung. 2013. dihw 5 (2). P. 24–29.

30. Thiel W. Reproduzierbare Verrundung von Schneidkanten an Mikrowerkzeugen. XIII Internationales Oberflächenkolloquium. Chemnitz 12–14 März 2012. P. 63–70.

31. Коваленко О. М. Технологічні процеси обробки матеріалів. Київ КНУТД 2021. 415 с.

32. Леоненко В. Є., Скирденко В. О. Дослідження стійкості магнітнооброблених різців зі швидкорізальної сталі. Науковий вісник ХДМІ. 2011. № 1 (4). С. 198–203.

33. Пилипенко І. С. Фінішна обробка поверхонь навчальний посібник. Дніпро ДНУ 2020. 290 с.

34. Савчук С. В. Сучасні методи фінішної обробки деталей машин. Київ Політехніка 2021. 372 с.

35. Тихонов С. І. Методи нанесення покриттів для підвищення працездатності інструменту. Харків НТУ «ХПІ» 2021. 228 с.

36. Breidenstein B., Gey C., Denkena B. Residual Stress Development in Laser Machined PVD-Coated Carbide Cutting Tools. Materials Science Forum. International Conference on Residual Stresses 9 (ICRS 9). 2013. P. 391–397.

37. Aurich J. C., Zimmermann M., Leitz L. The preparation of cutting edges using a marking laser. Production Engineering Research and Development. 2011. Vol. 5. P. 17–24.

38. Ho K. H., Newman S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43 (13). P. 1287–1300.

39. Koshy P., Tovey J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. CIRP Annals Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60 (1). P. 153–156.

40. Шевченко В. О. Обладнання та інструменти для обробки металів. Київ Ліра-К 2022. 346 с.

41. Jiang D., Anné G., Vleugels J., Vanmeersel K., Eeraerts W., Liu W. Residual stresses in hardmetals caused by grinding and EDM machining and their influence on the flexural strength. Proceedings of the 16th International Plasse Seminar Powder Metallurgical High Performance Materials. Reutte Austria 2005. Vol. 2. P. 1075–1085.

42. Klocke F., Krig T. Coated Tools for Metal Cutting Features and Applications. CIRP Annals Manufacturing Technology. 1999. Vol. 48 (2). P. 515–525.

43. Boothroyd G., Knight W. A. Fundamentals of Machining and Machine Tools. Boca Raton CRC Press 2020. 548 p.

44. Ковришкін М. О., Шевченко О. В., Довжук С. О. Методи формування зносостійких покриттів на різальному інструменті. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград 2010. Вип. 23. С. 62–69.

45. Childs T. H. C. Metal Machining Theory and Applications. Oxford Butterworth-Heinemann 2019. 472 p.

46. Marinescu I. D., Hitchiner M., Uhlmann E. Handbook of Machining with Grinding Wheels. Boca Raton CRC Press 2021. 675 p.

47. Лоскутов В. Ф., Хижняк В. Г., Куницкий Ю. А., Киндрачук М. В. Диффузионные карбидные покрытия. Київ Техніка 1991. 168 с.
48. Davim J. P. (ed.). *Surface Integrity in Machining*. London Springer, 2018. 286 p.
49. Diniz A. E., Marcondes F. C., Copping N. L. *Metal Cutting Fundamentals and Applications*. New York Springer 2021. 402 p.
50. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. New York Pearson 2022. 1184 p.
51. Костюк Г. И., Фадеев В. А., Бруйка О. О. Повышение работоспособности покрытий на РИ при обработке сталей с учетом адгезионного взаимодействия. Сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». Харків 2010. Вып. 3 (63). С. 63–72.
52. Dobrzański L. A., Śliwa A., Żukowska L. W., Mikula J., Gołombek K. Structure and mechanical properties of PVD coatings for tool materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010. Vol. 42 (1–2). P. 33–41.
53. Mubarak A., Hamzah E., Toff M. R. M. Review of physical vapour deposition (PVD) techniques for hard coating. *Jurnal Mekanikal*, 2005. No. 20. P. 42–51.
54. Strnad G., Buhagiar J. Latest developments in PVD coatings for tooling. *Scientific Bulletin of Petru Maior University of Tg. Mures*, 2012. Vol. 7 (XXIV) no. 1. P. 32–37.
55. Chintanikar S., Choundhury S. K. Wear behaviors of single-layer and multi-layer coated carbide inserts in high speed machining of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013. Vol. 27 (5). P. 1451–1459.
56. Cordes S. E. PVD-Alumina Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools A Study About the Effect on Friction and Adhesion Mechanism. *Tribology in Industry*, 2012. Vol. 34 no. 1. P. 4–28.
57. Jackson M. J., Robinson G. M., Morrell J. S. Machining M42 tool steel using nanostructured coated cutting tools. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007. Vol. 23 (1). P. 83–86.

58. Костюк Г. И., Миргородский А. Ю., Хаки Махмуд Салех. Силы резания при обработке конструкционных материалов твердыми сплавами с различными покрытиями. Сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». Харьков 2010. Вып. 2 (53). С. 165–172.

59. Dobrzański L. A., Golombek K., Mikuła J., Pakuła D. Cutting ability improvement of coated tool materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. Vol. 17 (1-2). P. 41–44.

60. Мазуренко Є. А., Герасимчук А. І., Овсянников Г. П. Хімічне осадження з газової фази синтез функціональних матеріалів (огляд). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2001. Т. 2 № 3. С. 339–349.

61. Outeiro J. C. On the effects of residual stresses induced by coated and uncoated cutting tools with finite edge radii in turning operations. J. C. Outeiro, A. M. Dias, I. S. Jawahir. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 35(1). P. 111–116.

62. Chen M. Development of diamond-coated drills and their cutting performance. M. Chen, X. G. Jian, F. H. Sun, B. Hu, X. S. Liu. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 129(1-3). P. 81–85.

63. Folea M. An overview of DLC coatings on cutting tools performance. M. Folea, A. Roman, N.-B. Lupulescu. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 8(3). P. 30–36.

64. Lei X. Effect of boron-doped diamond interlayer on cutting performance of diamond coated micro drills for graphite machining. X. Lei, L. Wang, B. Shen, F. Sun, Z. Zhang. *Materials*. 2013. Vol. 6(8). P. 3128–3138.

65. Uhlmann E. CVD diamond coatings on geometrically complex cutting tools. E. Uhlmann, J. Keerig. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 58(1). P. 65–68.

66. Kumar S., Singh R. *Advanced Machining Processes*. Singapore, Springer, 2020. 394 p.

67. Denkena B. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. B. Denkena, J. Koehler, M. Rehe. *Procedia CIRP*. Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012. Vol. 1. P. 190–195.

68. Kandráč L. Cutting edge preparation in machining processes. L. Kandráč, I. Maňková, M. Vrabel. *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology, Mechanika*. 2013. Vol. XXX, z. 85, no. 1. P. 149–159.

69. Denkena B. Cutting edge geometries. B. Denkena, D. Biermann. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 63(2). P. 631–633.

70. Kötter D. Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen. D. Kötter. *Schriftenreihe des ISF (Bd. 36)*, Institut für Spanende Fertigung. Essen, Vulkan-Verlag GmbH. 2006. 100 p.

71. Denkena B. Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process. Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature. B. Denkena, J. Köhler, M. S. Mengesha. *Production Engineering Research and Development*. 2012. No. 6. P. 329–333.

72. Denkena B. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load. B. Denkena, A. Lucas, E. Bassett. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60(1). P. 73–76.

73. Wyen C.-F. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. C.-F. Wyen, K. Wegener. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 59(1). P. 93–96.

74. Майборода В. С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішшю порошків. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ. Житомир, 2009. Вип. 6. С. 144–159.

75. Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. Влияние условий базирования режущих пластин в рабочих зонах на эффективность процесса обработки. В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, Б. М. Фесюн та ін. *Наукові праці ДНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство*. Донецьк, 2009. Вип. 6(154). С. 157–165.

76. Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. Формирование заданной шероховатости рабочих поверхностей режущих неперетачиваемых твердосплавных пластин. В. С. Майборода, В. Н. Гейчук, Е.С. Клишта. Наукові праці ДНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. Донецьк, 2010. Вип. 7(155). С. 142–151.

77. Matsumoto Y., Hashimoto T., Lahoti G. Machining of Hard Materials. London, Elsevier, 2019. 392 p.

78. Shaw M. C. Metal Cutting Principles. New York, Oxford University Press, 2020. 640 p.

79. Майборода В. С. Дослідження впливу в'язкості змащувально-охолоджуючого технологічного середовища на властивості магнітно-абразивного інструменту. В. С. Майборода, О. А. Іванюк. Вісник ІГТУУ КПІ. Машинобудування. 2004. Вип. 45. С. 99–102.

80. Thiele J.-D. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. J.-D. Thiele, S.-N. Melkote. Journal of Materials Processing Technology. 1999. Vol. 94(2–3). P. 216–226.

81. Майборода В. С. Магнітно-абразивна обробка кінцевого твердосплавного різального інструменту. В. С. Майборода, О. А. Плівак, С. В. Майдалик та ін. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. 2007. № 1(42), ч. 1. С. 66–70.

82. Майборода В. Магнітно-абразивне оброблення кінцевого різального інструменту в умовах великих магнітних щілин з використанням відновлювальних елементів. В. Майборода, Д. Джулій, І. Ткачук, О. Беляєв. Вісник ТНТУ. 2012. № 4(68). С. 133–141. (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки.)

83. Майборода В. С. Формирование магнитно-абразивного инструмента в рабочих зонах установок типа «кольцевая ванна». В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, І. В. Ткачук. Наукові праці ДНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. Донецьк, 2012. Вип. 9(205). С. 127–133.

84. Пат. 104328 Україна, МПК В24В 31/112 (2006.01). Спосіб магнітно-абразивного оброблення. Майборода В. С., Гейчук В. М., Джулій Д. Ю., Ткачук І. В. Заявник і патентовласник Київський політехнічний інститут. № а201201745. Заявл. 16.02.2012. Опубл. 27.01.2014. Бюл. № 2/2014.

85. Denkena B. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen. В. Denkena, J. Köhler, C. Ventura. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik 2012. Vol. 25(3). P. 92–97.

86. Майборода В. С. Структурно-фізическа модель формирования магнітно-абразивного інструмента в больших рабочих зазорах кольцевого типа при обработке стержневых изделий. В. С. Майборода, І. В. Ткачук, Д. Ю. Джулій. Наукові праці ДНУ. Серія Машинобудування і машинознавство. Донецьк. 2013. Вип. 1(10). С. 36–46.