

Детектор Плагіату v. 2961 - Звіт оригінальності: 12.05.2026 11:44:29

Перевірений документ: Маруняк.pdf Ліцензія: ВОЛОДИМИР МАТІЄВСЬКИЙ

🔍 Тип пошуку: Пошук Перепису 🔍 Знайдено мову: Uk

🔍 Тип перевірки: Інтернет-перевірка

TEE і кодування: PdfPig

Детальний аналіз документа документа:

🔍 Співвідношення:

Плагіат 0% Оригінал 99.21%
Цитати 0.79% ШІ 0%



🔍 Графік розподілу:



🔍 Джерела плагіату: 2

- 🔍 → 0% 🔍 1 1. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/43185/1/KPM_Вітковський.pdf
🔍 → 0% 🔍 1 2. <https://dspace.mipolytech.education/server/api/core/bitstreams/2262d7f4-7fd2-4983-8b...>

🔍 Дані оброблених ресурсів: 222 - ОК / 24 - Помилки

🔍 Важливі примітки:

Wikipedia:	Google Books:	Сервіси платних робіт:	Антицит:
			
[не знайдено]	[не знайдено]	[не знайдено]	[не знайдено]

🔍 Звіт проти обману UACE:

- Статус: Аналізатор **Увімкнений** Нормалізатор **Увімкнений** схожість символів встановлено **100%**
- Виявлений відсоток забруднення UniCode: **1,9%** з обмеженням: 4%
- Документ не нормалізовано: відсотків не досягнуто 5%
- Усі підозрілі символи будуть позначені фіолетовим кольором: **Abcd...**
- Знайдено невидимі символи: 0

Рекомендація з оцінки:

Ніяких особливих дій не потрібно. Документ в порядку.

Статистика алфавіту та аналіз символів:

🔍 Активні посилання (URL-адреси, витягнуті з документа):

URL не знайдені

 Виключено:

URL не знайдені

 Включено:

URL не знайдені

 Детальний аналіз документу:

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД

 Знайдено посилань: **0,01%**

id: 1

«ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА»

ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ КАФЕДРА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ
РЕСТОРАННОГО І ТУРИСТИЧНОГО БІЗНЕСУ МАРУНЯК ВАСИЛЬ БОГДАНОВИЧ ПІДВИЩЕННЯ
ЯКОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН Кваліфікаційна робота за спеціальністю 015.38

 Знайдено посилань: **0%**

id: 2

«Професійна освіта»

освітньо-професійна програма

 Знайдено посилань: **0%**

id: 3

«Транспорт»

Особистий підпис – _____ В. Б. Маруняк Науковий керівник – _____ д-р.х.н.,
професор, Е. В. Потапенко (підпис) (посада, науковий ступінь, наукове звання, ініціали,
прізвище) Зав. кафедри – _____ к.п.н., доцент, В. В. Бурдун_ (підпис) (посада,
науковий ступінь, наукове звання, ініціали, прізвище) Лубни – 2026 2 МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД

 Знайдено посилань: **0,01%**

id: 4

«ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА»

ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ КАФЕДРА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ
РЕСТОРАННОГО І ТУРИСТИЧНОГО БІЗНЕСУ Затверджую: Декан факультету технологій та
інформаційних систем _____ Могильний Г.А. Індивідуальний план здобувача
вищої освіти щодо виконання кваліфікаційної роботи 1. Маруняк Василь Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача) 2. Факультет технологій та інформаційних систем 3.
Спеціальність

 Знайдено посилань: **0%**

id: 5

«Професійна освіта. Транспорт»

4. Кафедра професійної освіти ресторанного і туристичного бізнесу 5. Науковий керівник
Потапенко Едуард Володимирович, д-р.х.н., професор (прізвище, ім'я, по батькові,
науковий ступінь, вчене звання) 6. Тема кваліфікаційної роботи Підвищення якості фінішної
обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при відновленні деталей машин 7. Термін
подання роботи на кафедру 08.05.2026 р. Відмітка Термін № Заходи про виконання
виконання 1. Вибір теми кваліфікаційної роботи, вивчення 10.10.2025 наукової літератури,
затвердження теми й керівника. 2. Розробка плану роботи, визначення мети, 14.11.2025
завдань, об'єкту, предмету, методів дослідження. 3. Робота над теоретичною частиною
05.12.2025 кваліфікаційної роботи, аналіз літературних джерел. 4. Подання теоретичної
частини кваліфікаційної 19.12.2025 роботи для першого читання науковим керівником. 5.
Усунення зауважень, урахування 16.01.2026 рекомендацій наукового керівника, подання
теоретичної частини кваліфікаційної роботи на друге читання. 6. Розробка технологічної і
конструкторської 30.01.2026 частин роботи. Поетапний аналіз та обговорення результатів
дослідної роботи. 7. Подання першого варіанта дослідної частини 20.02.2026
кваліфікаційної роботи на перевірку науковому керівникові. 8. Урахування рекомендацій
наукового 06.03.2026 керівника, збагачення роботи додатковими дослідженнями,
проведеними під час практики, підготовка варіанта роботи до попереднього захисту
роботи на кафедрі. 9. Попередній захист роботи на кафедрі. 20.03.2026 10. Доопрацювання
кваліфікаційної роботи з 03.04.2026 урахуванням рекомендацій після попереднього
захисту роботи на кафедрі. 11. Подання кваліфікаційної роботи науковому 17.04.2026
керівникові та рецензентові на підготовку відгуку й рецензії. 12. Подання на кафедру
остаточного варіанта 08.05.2026 кваліфікаційної роботи, підписаного випускником,
науковим керівником і рецензентом. Здобувач вищої освіти _____ Маруняк В. Б. (
підпис) (прізвище та ініціали) Керівник роботи _____ Потапенко Е. В. (підпис)
(прізвище та ініціали) 4 АНОТАЦІЯ У роботі розглянуто питання забезпечення точності
геометричної форми та якості мікрорельєфу внутрішніх циліндричних поверхонь при
відновленні блоків циліндрів ДВЗ. Висвітлено переваги растрового хонінгування як

прогресивного методу фінішної обробки, що дозволяє формувати специфічну топографію поверхні та усувати макрогеометричні похибки. Проаналізовано теоретичні засади растрової кінематики, механізми взаємодії абразивних зерен із металом та вплив складних коливальних траєкторій на інтенсивність знімання матеріалу. Надано порівняльну характеристику сучасних абразивних матеріалів, зокрема синтетичних алмазів та кубічного нітриду бору, а також обґрунтовано вибір металевих та еластичних зв'язок. Окрему увагу приділено технології керування параметрами точності через регулювання часу затримки інструменту в точках реверсу та застосування методу взаємної правки при обробці деталей

» Знайдено посилань: 0%

id: 6

«паке́том».

Визначено закономірності формування мікрозадирок у зоні обробки, проаналізовано причини виникнення дефектів форми, таких як бочкоподібність та сідлоподібність, і наведено рекомендації щодо оптимізації режимів осьової та кругової подач для їх мінімізації. Результати дослідження дозволяють підвищити якість обробки дзеркал циліндрів, забезпечити прецизійну точність отворів на рівні 1,5 мкм та створити ізотропний мікрорельєф, що сприяє утриманню мастила і значному підвищенню ресурсу двигунів після ремонту. Ключові слова: растрове хонінгування, блок циліндрів, мікрорельєф, макрогеометрія, кубічний нітрид бору (КНБ), шорсткість поверхні, точність форми, бочкоподібність, реверсування, взаємна правка, продуктивність обробки, дефекти циліндричності, якість відновлення ДВЗ. 5 6 ЗМІСТ ВСТУП

.....	8
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСУ ХОНІНГВАННЯ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ	10
1.1. Фізико-технологічні основи методу хонінгування та сфери його практичного застосування	10
1.2. Вплив технологічних показників на параметри якості при обробці алмазними брусками	13
1.3. Дослідження базового методу обробки класичним хонінгуванням	17
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТРАЄКТОРІЇ РАСТРОВОГО РУХУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ	20
2.1. Технологічні особливості обробки циліндричних поверхонь растровим методом	20
2.2. Часові характеристики растрової кінематики та параметри кадру	23
2.3. Аналіз швидкісних та динамічних параметрів растрового руху	27
РОЗДІЛ 3. КІНЕМАТИЧНІ СХЕМИ ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ	31
3.1. Вимірально-діагностичний комплекс MFK 500 для проведення прецизійних вимірювань	31
3.2. Методологія дослідження мікрорельєфу та параметрів шорсткості робочих поверхонь	36
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ РАСТРОВОГО ХОНІНГВАННЯ	38
4.1. Порівняльний аналіз кінематичних схем та показників процесу хонінгування	38
4.2. Дослідження впливу технологічних чинників на процес обробки блоків циліндрів	41
4.3. Дослідження механізмів формування мікрорельєфу та утворення задирок у процесі хонінгування	46
4.4. Комплексна оцінка показників продуктивності та якості при багатостадійному хонінгуванні	51
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ РАСТРОВОМУ ХОНІНГВАННІ	55
5.1. Аналіз впливу параметрів технологічної системи на точність геометричної форми циліндрів	55
5.2. Дослідження технологічних особливостей хонінгування циліндричних поверхонь для підвищення точності обробки	60
5.3. Закономірності формування мікрорельєфу та методи керування його параметрами	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
8 ВСТУП У сучасному	

машинобудуванні надійність та довговічність вузлів і механізмів є ключовими факторами їхньої конкурентоспроможності. Особливо гостро це питання постає при виробництві та відновленні двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), де деталі працюють в умовах високих швидкостей, знакозмінних навантажень та інтенсивного тертя. Експлуатаційні характеристики таких агрегатів – герметичність з'єднань, втомна міцність та зносостійкість – безпосередньо залежать від прецизійної точності та якості мікрорельєфу робочих поверхонь. Традиційні методи фінішної обробки, такі як шліфування, часто не дозволяють досягти необхідних параметрів без ризику появи термічних дефектів у поверхневому шарі. У цьому контексті хонінгування виступає як найбільш прогресивний метод, що забезпечує формування оптимальної шорсткості та виправлення геометричних похибок (овальності, конусності) завдяки принципу жорсткого кінематичного замикання контакту. Однак в умовах автоматизованого виробництва на лініях типу

» Знайдено посилань: 0%

id: 7

«Nagel»

виникає потреба в подальшій інтенсифікації процесу та підвищенні стабільності результатів, що робить впровадження інноваційних кінематичних схем, зокрема растрового хонінгування, надзвичайно актуальним. Об'єкт дослідження – процес фінішної абразивної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь блоків циліндрів ДВЗ із використанням інструментів на основі надтвердих матеріалів (синтетичних алмазів та кубічного нітриду бору). Предмет дослідження – кінематичні та технологічні закономірності формування мікрорельєфу та геометричної точності поверхонь при застосуванні растрової траєкторії руху хонінгувальної головки. Мета роботи полягає у підвищенні якості та ефективності обробки внутрішніх циліндричних поверхонь блоків циліндрів ДВЗ об'ємом 1,8 л шляхом 9 теоретичного обґрунтування та впровадження растрової кінематики хонінгування. Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання: 1. Проаналізувати фізико-технологічні основи методу хонінгування та вплив режимів обробки на параметри якості поверхневого шару. 2. Дослідити динаміку зони контакту

» Знайдено посилань: 0,01%

id: 8

«матеріал – абразив – зв'язка»

та теплові явища при використанні надтвердих матеріалів. 3. Вивчити особливості формування растрової траєкторії руху та її переваги у порівнянні з класичними методами хонінгування. 4. Обґрунтувати вибір характеристик алмазно-абразивного інструменту та режимів кінематики для забезпечення прецизійної точності отворів. Наукова новизна та практичне значення. Робота базується на комплексному аналізі взаємодії абразивних зерен із поверхнею в умовах складної нелінійної траєкторії. Застосування растрового методу дозволяє не лише покращити макрогеометрію отворів (знижити відхилення від циліндричності до рівня 5 мкм і менше), а й створити специфічний мікрорельєф, що сприяє утриманню мастила та підвищенню ресурсу двигуна. Результати дослідження можуть бути впроваджені на підприємствах з ремонту та виробництва вузлів автомобільної техніки для оптимізації технологічних циклів фінішної обробки 10 РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСУ ХОНІНГВАННЯ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ 1.1. Фізико-технологічні основи методу хонінгування та сфери його практичного застосування Хонінгування класифікується як прецизійний метод абразивної обробки, переважно внутрішніх циліндричних поверхонь, що є фінішною операцією з метою забезпечення заданих параметрів макрогеометрії та мікрорельєфу. Процес спрямований на усунення відхилень, що залишилися після попередніх етапів механічної обробки (розточування, шліфування), та дозволяє досягти показників шорсткості поверхні у межах $Ra = 0,63 \dots 0,08$ мкм, при цьому відхилення від циліндричності та похибки геометричної форми мінімізуються до рівня, що не перевищує 5 мкм. Технологічна кінематика процесу базується на поєднанні трьох складників руху робочого інструменту (хонінгувальної головки): 1. Обертальний рух навколо власної осі. 2. Зворотно-поступальний рух уздовж осі циліндра. 3. Радіальне переміщення абразивних брусків для створення необхідного питомого тиску на оброблювану поверхню. Ефективність хонінгування зумовлена інтенсивним застосуванням мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) у зоні контакту. Функціональне призначення МОР полягає у примусовій евакуації продуктів зносу (мікрочасток металу та абразиву), зниженні коефіцієнта тертя та запобіганні термічній деструкції поверхневого шару шляхом відведення теплоти з зони різання, що безпосередньо впливає на стійкість інструменту. У

технологічному циклі відновлення деталей машин хонінгування найчастіше є завершальною стадією, що формує необхідний експлуатаційний 11 мікрорельєф. Попри певну кінематичну схожість із процесом суперфінішування, хонінгування має принципову відмінність у механізмі взаємодії. Якщо при суперфінішуванні застосовуються демпфувальні елементи, що можуть копіювати вихідні похибки профілю, то хонінгування базується на принципі жорсткого кінематичного замикання контакту, що забезпечує виправлення геометричних дефектів форми (овальності, конусності тощо). Основними ознаками, що характеризують технологію абразивного хонінгування, є: □ велика площа робочого контакту інструменту з поверхнею заготовки; □ одночасна взаємодія значної кількості абразивних зерен із металом у плямі контакту; □ складна траєкторія руху зерен за порівняно низьких швидкостей різання; □ низькотемпературний режим обробки, що виключає появу припикань та неконтрольованих залишкових напружень. Якість обробленої поверхні та зносостійкість деталей корелюють із комплексом технологічних чинників, які доцільно класифікувати за такими групами: 1. Режимні та матеріалознавчі параметри: фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу; характеристики абразивних брусків (матеріал зв'язки, зернистість, концентрація абразиву); склад та властивості МОР. 2. Кінематичні характеристики: вид траєкторії відносного руху; закономірності зміни швидкостей та прискорень; щільність та кут перетину сітки слідів обробки. 3. Динамічні параметри: закономірність зміни питомого тиску в зоні контакту; силові залежності процесу різання; механізм радіальної подачі хонінгувальної головки. 12 Вибір характеристик інструменту (алмазних чи ельборових брусків) здійснюється на основі аналізу властивостей заготовки та вимог до параметрів шорсткості [1, 76, 94, 109].

Рациональний підбір абразивів дозволяє стабілізувати показники геометричної точності. Аналіз сучасного стану досліджень у галузі абразивного та алмазного хонінгування [16, 25] свідчить про накопичення значного масиву даних щодо закономірностей формування мікрорельєфу та впливу кінематики верстата на якість продукції. Розроблено галузеві рекомендації стосовно налагодження операцій для конкретних умов виробництва [1, 9, 10]. Разом з тим, впровадження нових надтвердих матеріалів (наприклад, кубічного нітриду бору – КНБ) дозволило розширити сферу застосування методу на обробку металокераміки, високоміцних чавунів та загартованих сталей [25]. Попри це, питання стабільності процесу, забезпечення прецизійної точності при максимальній продуктивності та економічній доцільності в умовах відновлення деталей залишаються актуальними та потребують подальшого наукового обґрунтування. Особливої актуальності дослідження набуває при обробці блоків циліндрів сучасних ДВЗ об'ємом 1,8 л, які характеризуються високою питомою потужністю та підвищеними вимогами до тепловідведення.

Конструктивною особливістю таких блоків (найчастіше виготовлених з чавуну марки Gh 190B або алюмінієвих сплавів із товстостінними чавунними гільзами) є мала міжциліндрова відстань та відносно тонка перемичка (3,5–5,0 мм). Це створює ризик термічних та пружних деформацій під час фінішної обробки. Застосування растрової кінематики в поєднанні з надтвердими абразивами дозволяє мінімізувати радіальні складові сили різання та рівномірно розподілити теплове навантаження по довжині гільзи. Це забезпечує стабільність геометричної форми прецизійних отворів та формування мікрорельєфу, здатного утримувати мастило 13 в умовах інтенсивних знакозмінних навантажень, характерних для двигунів зазначеного літражу.

1.2. Вплив технологічних показників на параметри якості при обробці алмазними брусками

Формування заданих параметрів макрогеометрії при хонінгуванні реалізується шляхом мікрорізання матеріалу одночасно великою кількістю абразивних зерен. Деформація поверхневого шару при нанесенні мікросітки (рисок) є результатом складного поєднання механіко-кінематичних, фізичних та хімічних процесів, інтенсивність яких варіюється залежно від режимів обробки. В основі фізико-механічної природи хонінгування лежить явище абразивного зношування твердих тіл у процесі їх відносного руху. Оскільки твердість алмазних зерен суттєво перевищує твердість оброблюваного матеріалу, домінуючим механізмом деструкції поверхні є мікрорізання. Згідно з дослідженнями І. В. Крагельського, взаємодія абразивних часток із металом супроводжується не лише зніманням матеріалу, а й інтенсивною пластичною та пружною деформацією. Процес абразивної обробки вимагає ефективного видалення диспергованих часток металу та шламу з зони різання, що досягається шляхом інтенсивного подавання мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). За даними М. М. Хрущова та М. А. Бабишева, попри відмінності у режимах взаємодії абразиву з поверхнею, механізм руйнування має спільні риси зі звичайним зношуванням матеріалів. Водночас В. Н. Кашеев зазначає, що ступінь закріплення зерен радикально змінює характер їхньої дії на

метал: жорстко зафіксоване зерно та вільний абразив діють за різними фізичними моделями. 14 На основі експериментальних даних Н. І. Богомолу, інтенсивність деструкції металу α залежно від питомого тиску хонінгування описується залежністю: (1.1) де: α – коефіцієнт, що враховує умови обробки; p – питомий тиск у зоні контакту, МПа; β – показник ступеня, що характеризує спосіб фіксації абразиву. 0 Для жорстко закріплених зерен (алмазні бруски) значення $\beta \approx 1,0$, тоді як 0 при роботі незакріпленим абразивом цей показник знижується до 0,7...0,8. Механізм взаємодії інструменту з поверхнею визначається відношенням глибини занурення зерна k до радіуса закруглення його вершини s : β при $k/s \leq 0,02$ спостерігається суто пружне відтиснення; β при $0,02 < k/s \leq 0,5$ відбувається пластичне деформування; β при $k/s > 0,5$ реалізується безпосередньо мікрорізання. Кількість циклів взаємодії, необхідних для руйнування матеріалу, при 5 7 2 3 пружному контакті становить 10 ... 10 , при пластичному – 10 ... 10 , а при мікрорізанні деструкція відбувається за одиничний акт дії. Отже, саме мікрорізання є визначальним чинником продуктивності хонінгування. Завдяки інтенсивному пластичному деформуванню та порівняно невисоким температурам у зоні контакту, у поверхневому шарі металу виникає зміцнення (наклеп) та формуються залишкові напруження стиску. Глибина напруженого шару залежно від режимів варіюється від 5 до 15 мкм, причому максимальні значення напружень зосереджені у приповерхневому шарі товщиною 1,0...1,5 мкм. Фізико-хімічні аспекти обробки проявляються у формуванні оксидних плівок та адсорбційних шарів. Використання у складі МОР поверхнево-активних 15 речовин (ПАР) ініціює ефект Ребіндера – адсорбційне зниження міцності поверхневого шару. Це полегшує пластичний зсув металу, знижує енергоємність процесу та покращує якість формованої поверхні. Результати досліджень підтверджують, що зменшення товщини зрізу при одночасному зростанні швидкості мікрорізання веде до суттєвого збільшення питомих енерговитрат. Зокрема, механічна робота зростає у кілька разів при зменшенні товщини шару, що знімається, з 0,1 до 0,001 мм. Для пояснення фізичних явищ абразивної деструкції твердих тіл у науковій практиці застосовують два базові підходи. Перший базується на математичному моделюванні механіки зіткнення поодиноких абразивних часток із поверхнею. Другий метод полягає у моделюванні механізму взаємодії масиву закріплених або вільних зерен із поверхневим шаром заготовки. Численні експерименти з мікрорізання (індентування) поодиноким зерном дозволили розкрити фундаментальні закономірності процесу мікрорізання. Аналіз напружено-деформованого стану в зоні контакту індентора з твердим матеріалом дозволив кількісно визначити зусилля різання, частку енергії, що витрачається на пластичне деформування, та втрати на тертя. Встановлено залежність морфології зносу абразиву від кінематичних параметрів, геометрії частинок та фізико-механічних властивостей пари тертя. Однак феноменологічна модель взаємодії поодинокого зерна не забезпечує всебічного розуміння напруженого стану в умовах реальної обробки, де руйнування матеріалу є наслідком багаторазового циклічного впливу сукупності часток. Крім того, при хонінгуванні виникає необхідність розгляду триботехнічної системи як трикомпонентної взаємодії:

” Знайдено посилань: **0,01%**

id: 9

«матеріал заготовки – абразивне зерно – матеріал зв'язки».

Особливий науковий інтерес становить вивчення динаміки зони контакту алмазно-абразивного інструменту на засадах теорії пружно-пластичного контактного впливу. В робочій зоні одночасно протікають такі процеси: 16 1. Чисте тертя абразиву об метал без видимих ознак деформації. 2. Пластичне витіснення (перерозподіл) металу без порушення його суцільності. 3. Мікрорізання з формуванням мікростружки, що супроводжується інтенсивною пластичною деформацією. Переважання того чи іншого механізму детермінується рельєфом ріжучої поверхні бруска, фізико-механічними властивостями металу та режимами обробки. Встановлено, що розподіл алмазних часток за висотою над рівнем зв'язки підпорядковується закону нормального розподілу. Виступ зерен над зв'язкою становить приблизно 10% від їхнього діаметра для зернистості 50/40 та 3–6% для діапазону 200/160–400/315. Для об'єктивної оцінки фактичної площі контакту ефективним є метод використання безбарвних полімерних плівок товщиною близько 25 мкм. Дана методика дозволяє диференціювати: α площу пружного та пластичного контакту абразивних часток; β кількість активних (ріжучих) зерен; γ площу фактичного контакту зв'язки з поверхнею. Дослідженнями встановлено, що при збільшенні питомого тиску фактична площа контакту алмазного бруска зростає для всіх типів зернистості. При цьому при обробці сталей цей показник зростає менш інтенсивно, ніж при хонінгуванні чавунів.

Також виявлено специфіку розподілу навантаження: при обробці чавуну брусками марки АС6 80/63-М1 площа контакту абразивних часток у кілька разів перевищує площу контакту зв'язки, тоді як при обробці сталей спостерігається зворотна тенденція. Аналіз працездатності інструменту вказує на те, що частка безпосередньо ріжучих зерен є відносно малою: для брусків АСС 250/200-М2 при обробці чавуну вона становить 6,3–8,1%, а при обробці сталі – лише 2,0–3,0%. Використання менш міцних алмазів (наприклад, марки АС4) знижує кількість ріжучих зерен до 0,7–0,8% від їх загальної кількості. Теплові явища при хонінгуванні зумовлені переважно зовнішнім тертям та роботою пластичної деформації. Важливою перевагою надтвердих матеріалів (алмаз, КНБ) є те, що загальне тепловиділення при їх застосуванні в 1,5–2 рази нижче порівняно зі звичайними абразивами. Температура в зоні алмазного хонінгування зазвичай стабілізується на рівні 40–50°C, тоді як при абразивному вона досягає 95–100°C. Зношування інструменту при хонінгуванні має комплексну адгезійно- втомну, абразивну та дифузійну природу. При обробці в'язких сталей домінують адгезійні процеси. Забруднення (засалювання) алмазних брусків відбувається не лише через адгезію, а й внаслідок механічного заклинювання стружки у зв'язці. Натомість інструменти з кубічного нітриду бору (ельбору, кубоніту) демонструють високу стійкість до наростоутворення завдяки хімічній інертності до заліза, що робить їх найбільш ефективними для фінішної обробки сталевих поверхонь. 1.3. Дослідження базового методу обробки класичним хонінгуванням Формування прецизійних отворів методами доводки та хонінгування є результатом комплексної взаємодії кінематичних, динамічних та технологічних чинників. Встановлення кореляційних зв'язків між об'ємом знятого металу та параметрами процесу дозволяє прогнозувати та оптимізувати режими обробки циліндричних поверхонь. На сучасному етапі алмазне хонінгування широко застосовується на операціях попередньої та чистової обробки. Проте стандартний інструмент має певні обмеження: інтенсивне закруглення різальних крайок брусків та відносно низький період стійкості при роботі у важких режимах. Одним із ефективних 18 способів інтенсифікації процесу, зокрема для видалення задирок, є застосування складної нелінійної траєкторії руху абразивних часток по довжині кромки перетину [17], що реалізується за допомогою растрового методу хонінгування. Теоретичні та практичні аспекти формування точних отворів детально висвітлені у наукових працях. Встановлено, що для ефективного виправлення овальності (еліпсності) необхідно використовувати хонінгувальні головки з парною кількістю брусків. При цьому критичне значення має співвідношення довжини брусків та оброблюваного отвору. Застосування надто коротких брусків призводить до виникнення хвилястості поверхні через нерівномірність знімання металу по довжині твірної. Нерівномірність контактування інструменту зі стінками циліндра обумовлена параметрами перебігу (вибігу) інструменту за межі отвору, габаритами деталі та співвідношенням швидкостей обертального та зворотно-поступального рухів. У низці досліджень [33] доведено можливість підвищення ефективності виправлення початкових похибок геометрії шляхом інтенсифікації знімання металу в зонах найбільших відхилень. Під час перших циклів обробки контакт інструменту з поверхнею має локальний характер, що створює питомий тиск, який суттєво перевищує номінальний. Для нівелювання локальних невідповідностей уздовж осі деталі необхідне забезпечення оптимального співвідношення довжини ходу інструменту, частоти осциляції та регульованої затримки в крайніх положеннях. Додатковим резервом підвищення продуктивності виправлення форми є збільшення жорсткості механізму розтискання брусків та врахування динамічних коливань крутного моменту. Сучасні тенденції розвитку методу спрямовані на створення керованих процесів хонінгування. У роботах [12] зазначається, що в процесі усунення первинних відхилень можуть виникати вторинні похибки форми, спричинені: □ геометричною неточністю обладнання та похибками його налагодження; □ нерівномірним зношуванням абразивних брусків по довжині; 19 □ нераціонально підбраною кінематичною схемою. Високих показників точності при алмазному хонінгуванні можна досягти шляхом автоматичного керування параметрами в режимі реального часу. Рівномірний розподіл брусків по робочій поверхні інструменту дозволяє стабілізувати шорсткість та підвищити зносостійкість алмазозносного шару на 50% [33, 34]. Щільність та характер розподілу мікроподрипин (сітки) залежать від прийнятої кінематичної схеми, геометричних параметрів інструменту та заготовки. Застосування верстатів із ЧПК та адаптивних систем керування дозволяє погоджувати режими кінематики з динамікою тиску на поверхню. Це забезпечує стабільність геометричної форми циліндрів у межах 0,004–0,005 мм. Проте для фінішної обробки прецизійних отворів із жорсткішими допусками можливостей класичного хонінгування

залишається недостатньо, що вимагає пошуку нових технологічних рішень. 20 РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТРАЄКТОРІЇ РАСТРОВОГО РУХУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ 2.1. Технологічні особливості обробки циліндричних поверхонь растровим методом Формування поверхонь при різних методах хонінгування базується на відносному переміщенні інструменту та заготовки, де траєкторія руху різальних зерен визначається сукупністю кінематичних та динамічних чинників. При обробці поверхонь першого порядку (площин) методами растрової абразивної доводки достатньо одного складного руху формоутворення. Однак для генерації циліндричних поверхонь другого порядку необхідна реалізація двох взаємопов'язаних рухів. Це обумовлено геометричною природою циліндра: його твірна є прямою лінією, а напрямна розташована у перпендикулярній площині кола. На рис. 2.1 представлена принципова схема елементарної кінематики процесу растрового хонінгування. Рис. 2.1. Кінематика елементарної динаміки під час хонінгування з растровим рухом. 1. – окружне обертання інструменту 2. – поздовжнє переміщення інструменту) 21 Принципова відмінність хонінгування від процесів доводки малих деталей полягає у співвідношенні габаритів: при хонінгуванні площа оброблюваної поверхні зазвичай суттєво перевищує робочу площу інструменту. Це вимагає специфічного налаштування кінематичних зв'язків обладнання для забезпечення рівномірності сітки обробки (рис. 2.2). Рис. 2.2. Послідовність утворення траєкторії різального зерна. 1. амплітуда A в осьовому переміщенні 2. амплітуда B в круговому переміщенні 3. траєкторія переміщення точки в традиційному хонінгуванні 4. Траєкторія переміщення точки в растровому хонінгуванні 5. Подовжня вісь циліндра. Ключова особливість растрового хонінгування полягає в тому, що головний рух різання є результатом суперпозиції двох синусоїдальних коливань із різними частотами ω_x , ω_y та амплітудами A і B , що діють у взаємно 1 2 перпендикулярних напрямках (осьовому та тангенціальному). Для рівномірного розподілу сітки мікроподряпин (растра) по всій поверхні деталі до коливальних рухів додаються вектори швидкості осциляції $\dot{x}$ та ос кругової подачі $\dot{y}$. В результаті такої кінематичної взаємодії траєкторія руху кр 22 хонінгувальної головки формує складну криву, яку доцільно класифікувати як

Знайдено посилань: 0%

id: 10

«растрову циклоїду».

Положення точки на поверхні циліндра в будь-який момент часу t описується параметричними функціями координат: $x = x(t)$; $y = y(t)$; $z = z(t)$ (2.1) 1 2 3 Для детального аналізу складну просторову траєкторію розгортають на площину, де вісь ординат Y збігається з віссю деталі, а вісь абсцис X відповідає довжині кола. Рівняння руху точки на плоскій розгортці має вигляд:
$$\begin{cases} x = A \sin \omega_x t + B \sin \omega_y t \\ y = B \cos \omega_y t \end{cases} \quad (2.2)$$
 де: A, B – амплітуди осьових та кругових коливань відповідно; ω_x, ω_y – циклічні частоти коливань; ϕ_0 – початковий зсув фаз; $\dot{x}, \dot{y}$ – швидкості кругової та осьової подач. кр ос Без урахування переносних рухів ($\dot{x}, \dot{y}$) траєкторія являє собою замкнену кр ос фігуру Ліссажу, вписану в прямокутник зі сторонами $2A \times 2B$. Періоди коливань визначаються як: $T_x = 2\pi / \omega_x$, $T_y = 2\pi / \omega_y$ (2.3) 1 2 2 Параметри результуючого руху в растровому хонінгуванні залежать від векторної суми всіх елементарних переміщень. Встановлено, що довжина шляху різання та кут перетину слідів обробки є функціями відносних значень швидкостей кожного простого руху. Дослідження кінематичних властивостей растрового руху, започатковані В. П. Некрасовим для плоских поверхонь, були адаптовані нами для циліндричних поверхонь. Це дозволило виявити закономірності впливу осьової 23 (S) та кругової (ϕ) подач на геометричну точність та формування ос кр мікрорельєфу відновлених деталей. 2.2. Часові характеристики растрової кінематики та параметри кадру Для аналітичного дослідження растрових траєкторій доцільно представити параметричні рівняння через фазові кути складних коливань. Використовуючи аргумент $\theta = \omega t + \phi_0$ як поточну фазу, функція переміщення набуває вигляду:
$$x = A \sin \theta + B \sin \omega_y t \quad (2.4)$$
 Між періодами взаємно перпендикулярних коливань існує фундаментальне співвідношення: $\omega_x T_x = \omega_y T_y = 1$ (2.5) m, n – прості взаємно цілі числа. За час T , що визначається як: $T = T_x / m = T_y / n$ (2.6) 1 2 реалізується повний цикл повторення траєкторії, що відповідає цілому числу періодів обох складників коливань [33]. Формула (2.6) описує період формування замкненої фігури Ліссажу. Якщо відношення частот є ірраціональним числом, період T прямує до нескінченності, а рух точки класифікується як неперіодична функція [40]. У реальних технологічних системах через обмежену точність налаштування

за час формування кадру Δt у напрямку осей Ox , Oy (при $\Delta t = 0$). Довжину кадру l розрахуємо Δt 1 1 0 Δt шляхом інтегрування швидкості переміщення в системі координат, пов'язаній із гвинтовою лінією: $2 \Delta t \int_0^{2\pi} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt = l$ (2.14) $\int_0^{2\pi} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt$ 0 $\int_0^{2\pi} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt$ Час T описує повторюваність циклів на гвинтовій лінії. Величина кадру Δt має вирішальне значення для рівномірності обробки. Залежність розміру кадру від середнього співвідношення частот (f_x / f_y) візуалізована на малюнку 2.6. 1 2 ср Рис. 2.6. Залежність розміру кадру від співвідношення частот у напрямку гвинтової лінії 2.3. Аналіз швидкісних та динамічних параметрів растрового руху Для повного розрахунку кінематики растрового хонінгування необхідна детальна інформація про режими різання, швидкості подач, параметри коливальних рухів, а також характер зміни миттєвих швидкостей та прискорень. Миттєва швидкість точки у довільний момент часу визначається як перша похідна від параметричних рівнянь руху (2.1) за часом t . При початковому зсуві фаз $\phi = 0$, проекції швидкості на осі координат мають вигляд: 0

28 $\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} = v \cos \alpha \vec{i} + v \sin \alpha \vec{j}$ 1 1 кр $\{ \vec{v} \} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v^2 \cos^2 \alpha + v^2 \sin^2 \alpha} = v$ Модуль повної миттєвої швидкості визначається як геометрична сума її проекцій: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ (2.15) $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

Характер зміни миттєвої швидкості протягом періоду кадру наведено на рис. 2.7. Аналіз графіка свідчить, що екстремальні значення швидкості досягаються на початку, у середині та наприкінці періоду кадру. Рис. 2.7. Зміна вектора миттєвої швидкості за період кадру

Для практичних розрахунків інтенсивності знімання матеріалу використовують середню швидкість різання v_r , яка для растрового руху з v_r урахуванням амплітудних та лінійних складників може бути апроксимована залежністю: $v_r \approx (0,67 v \sin \alpha) + (0,67 v \cos \alpha) + (v_x + v_y) \sin \alpha$ (2.17) $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

Рис. 2.8. Залежність середньої швидкості від частоти коливач при різних значеннях швидкостей подачі наведено на рис. 2.8. 29 Рис. 2.8. Залежність середньої швидкості від частоти коливач (при подачах 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 мм/с) Тип формованої траєкторії безпосередньо залежить від співвідношення швидкостей складників руху. Аналіз кінематичних параметрів дозволяє визначити критичні області переходу від растрової кінематики до віброхонінгування. Основною умовою такого переходу є нівелювання реверсивного характеру руху часток протягом періоду кадру. У теорії обробки розрізняють два варіанти віброхонінгування: 1. Односпрямоване: вектор швидкості зберігає сталий напрямок, а обертання відбувається в один бік без зміни знаку кута нахилу траєкторії. 2. Різнострамоване: вектор швидкості та напрямок руху протягом одного циклу змінюються неодноразово (реверсивний рух). Межа між односпрямованим та різнострамованим рухами визначається критичним співвідношенням параметрів, яке можна виразити через коефіцієнт нерівномірності швидкості: $K_v \approx 1,6$ (2.18) $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

Численні дослідження [34, 35] підтверджують, що використання різнострамованої кінематики суттєво інтенсифікує знімання металу та підвищує якість обробленої поверхні. Динамічний стан системи характеризується повним прискоренням $\vec{W}(t)$, яке визначається як друга похідна від параметричних рівнянь руху (2.1) за часом. 30 Повне прискорення є векторною сумою тангенціального та нормального прискорень: $W = \sqrt{W_t^2 + W_n^2}$ (2.19) $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ де ρ – радіус кривизни траєкторії. Графік зміни миттєвого повного прискорення протягом періоду кадру представлено на рис. 2.9. Різкі коливання прискорення сприяють кращому самогостренню абразивних зерен та інтенсифікації процесу мікрорізання. Рис. 2.9. Зміна миттєвого повного прискорення протягом періоду кадру

31 РОЗДІЛ 3. КІНЕМАТИЧНІ СХЕМИ ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

3.1. Вимірювально-діагностичний комплекс MFK 500 для проведення прецизійних вимірювань

Для проведення експериментальних досліджень та метрологічного контролю геометричних параметрів циліндричних поверхонь використано високопрецизійний вимірювальний комплекс MFK 500. Дана система спеціально спроектована для лабораторій та відділів технічного контролю (ВТК) з метою проведення комплексного аудиту форми великогабаритних деталей машин, зокрема блоків циліндрів, гільз, колінчастих та розподільних валів, а також компонентів прецизійної гідравліки. Основою приладу є масивна гранітна плита, що має високу термічну стабільність та вібростійкість, що дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх чинників на результати вимірювань. Робочий стіл базується на аеростатичних підшипниках, що забезпечує безфрикційне та надточне переміщення об'єктів у вимірювальній зоні. Конструктивні та функціональні особливості системи MFK 500:

1. Багатоосьова архітектура: комплекс оснащений 3 основними вимірювальними осями та 4 допоміжними калібрувальними осями для позиціонування.
2. Адаптивне позиціонування: наявність поворотного щупа та системи автоматичного центрування дозволяє проводити вимірювання деталей зі складною конфігурацією (наприклад, V-подібних блоків) у повністю автоматичному режимі.
- 32 3. Метрологічна точність: вимірювальний шпиндель (вісь C) інтегрований з віссю R, що забезпечує автоматичне відстеження профілю деталі навіть при значному відхиленні її встановлення від геометричного центру.
4. Стандартизація: оцінка параметрів макрогеометрії та шорсткості проводиться у суворій відповідності до міжнародного стандарту ISO 1101. 5. Система захисту: слідкувальні приводи оснащені датчиками захисту від зіткнень, що гарантує безпеку прецизійних щупів при обробці глибоких та складних отворів.

Вертикальне переміщення блоку вимірювання круглості забезпечується віссю Z, що дозволяє аналізувати прямолінійність твірної циліндра за трьома координатами. Інтегровані калібрувальні осі (A та B) автоматично вирівнюють деталь, скорочуючи час підготовки до вимірювального циклу. Використання комплексу MFK 500 дозволяє отримувати вичерпну інформацію про відхилення форми, такі як конусність, овальність та

бочкоподібність, з автоматичною генерацією графічних звітів. Рис. 3.1. Вимірювальний-діагностичний комплекс [MFK 500](#) для контролю похибок геометричної форми. 33 Нижче наведено результати первинних вимірювань циліндрів блоку до проведення відновлювальних робіт, що демонструють характерні відхилення профілю поздовжнього перерізу (бочкоподібність). 11/09/2025 Рис. 3.2. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності (бочкоподібність) циліндра №1. 34 Рис. 3.3. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності (бочкоподібність) циліндра №2. 35 Рис. 3.4. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності (бочкоподібність) циліндра №3. 36 3.2. Методологія дослідження мікрорельєфу та параметрів шорсткості робочих поверхонь Для прецизійного вимірювання параметрів шорсткості, хвилястості та профілю оброблених циліндричних поверхонь у роботі використано вимірювальний комплекс [HOMMEL-WERKE TURBO WAVE V7.20](#). Дане обладнання дозволяє проводити комплексний аналіз мікрогеометрії деталей складної форми, визначати радіуси дуг, координати точок, кутові величини, а також будувати просторову топографію поверхні. Дія комплексу базується на методі безпосереднього індентування (обмацування) мікронеровностей досліджуваної поверхні алмазною голкою вимірювального перетворювача. Механічні коливання щупа, що виникають під час його переміщення, трансформуються в електричні сигнали, пропорційні амплітуді нерівностей. Отриманий сигнал посилюється та оцифровується електронним блоком для подальшої математичної обробки та візуалізації на ЕОМ. Прилад має модульну структуру, що дозволяє адаптувати його під конкретні вимірювальні завдання за допомогою мережевого інтерфейсу [HOMMEL-WERKE CAN-BUS](#). До складу комплексу входять: 1. Вимірювальний перетворювач: індуктивний датчик із набором змінних щупів (різного радіуса закруглення та матеріалу виготовлення). 2. Приводи подачі [Waveline 120 / Waveline 200](#): оснащені високоточною інтегрованою базовою площиною, що дозволяє використовувати безопорні датчики для підвищення точності вимірювань. 3. Моторизована колона: забезпечує вертикальне позиціонування та поворот привода у вертикальній площині на кут $\pm 45^\circ$, з можливістю прецизійного мікрометричного налаштування в межах $\pm 5^\circ$. 37 4. Пристрій [Y-Positioner](#): моторизований столик для точного переміщення деталі по осі Y, що є критично важливим при побудові 3D-мікротопографії поверхні. Застосування даного комплексу дозволяє здійснювати повну оцінку параметрів шорсткості (R_a , R_z , R_{max} тощо) та аналізувати вплив растрової кінематики на формування регулярного мікрорельєфу відновлених деталей машин. Рис. 3.5. Вимірювальна станція [HOMMEL-WERKE TURBO WAVE V7.20](#) для контролю параметрів мікрорельєфу 38 РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ РАСТРОВОГО ХОНІНГУВАННЯ

4.1. Порівняльний аналіз кінематичних схем та показників процесу хонінгування з метою підтвердження теоретичних висновків щодо ефективності керування траєкторією робочого руху хонінгувальної головки було проведено серію порівняльних експериментів. У ході досліджень зіставлялися показники традиційного та растрового хонінгування. Для забезпечення ідентичності умов експерименту використовувалося єдине технологічне середовище та інструмент, параметри яких наведено в табл. 4.1. Таблиця 4.1. Параметри налаштування технологічного обладнання

Параметр обробки	Растрове	Традиційне хонінгування
Швидкість різання $\diamond \diamond$, м/хв	різ	різ
Кількість брусків у головці	2	2 шт
Питомий тиск P , МПа	0,1 – 1,0	0,1 – 1,0

Обладнання

» Знайдено посилань: 0% id: 13

«[Nagel](#)»

» Знайдено посилань: 0% id: 14

«[Nagel](#)»

Склад ЗОР (СОЖ) 70% гасу, 30% 70% гасу, 30% мастила мастила

» Знайдено посилань: 0% id: 15

«Індустріальне»

» Знайдено посилань: 0% id: 16

«Індустріальне»

Вибір режимів обґрунтовано технічними можливостями кінематики верстата

» Знайдено посилань: 0% id: 17

«[Nagel](#)».

Обробка проводилася для зразків зі сталі 95X18 (HRC 54...58) діаметром 18 мм та довжиною 60 мм. Використовувалися алмазні бруски AC6 80/63-M5-07-100% та KP 80/63-M5-07-100%. Вихідна шорсткість поверхні перед кожним етапом підтримувалася на стабільному рівні. Результати експериментальних досліджень узагальнено в табл. 4.2. 39

Таблиця 4.2. Результати порівняльних досліджень показників процесу Метод обробки
Показник 0,2 0,3 0,4 0,5 0,7 0,9 0,95 МПа МПа МПа МПа МПа МПа МПа 12,0 20,0 25,5 34,0
50,0 78,0 83,5 Растрове Q хонінгування (мкм/хв) 0,40 – 0,37 – 0,40 – 0,64 Ra, мкм 0,016 0,023
0,025 0,028 0,024 0,07 0,09 $\diamond\diamond$ / $\diamond\diamond$ ас мет – – 13,0 – 34,0 63,0 – Традиційне Q хонінгування
(мкм/хв) – – 0,53 – 0,52 0,76 – Ra, мкм – – 0,022 – 0,020 0,035 – $\diamond\diamond$ / $\diamond\diamond$ ас мет Аналіз

отриманих даних свідчить про суттєві переваги растрового методу: при нижчих значеннях параметрів шорсткості продуктивність знімання металу (Q) у 1,5–2 рази вища порівняно з традиційним способом. Встановлено, що весь діапазон досліджуваних питомих тисків можна розділити на три характерні зони: 1. Зона пластичного деформування (до 0,2 МПа): глибина впровадження абразивних зерен недостатня для ефективного мікрорізання; формоутворення відбувається переважно за рахунок багаторазових пластичних деформацій поверхневого шару. 2. Зона стабільного мікрорізання (0,2 – 0,9 МПа): забезпечується оптимальний баланс між продуктивністю та якістю поверхні; цей діапазон є раціональним для основного технологічного циклу. 3. Зона деструктивного зношування (0,9 МПа): спостерігається інтенсивне виривання абразиву зі зв'язки, що призводить до різкого зростання шорсткості та прискореного спрацювання інструменту. Даний режим є критичним і небажаним для експлуатації алмазних брусків. Растрове хонінгування демонструє стабільну роботу на менших тисках завдяки складній різноспрямованій траєкторії, що активізує ефект 40 самозагострення брусків та запобігає їх засалюванню навіть при використанні дрібнозернистого інструменту. Додаткове порівняння з методом осьової осциляції наведено в табл. 4.3. Таблиця 4.3. Порівняльні показники методів хонінгування (бруски KM 80/63-M5-2- 100%) Показник процесу Традиційне 3 осьовою осциляцією Растрове Продуктивність Q, мкм/хв 20 31 33 Шорсткість Ra, мкм 0,301 0,320 0,206 Рис. 4.1. Діаграма порівняльної продуктивності: 1 – традиційне; 2 – з осьовою осциляцією; 3 – растрове. Дані підтверджують, що растровий спосіб є найбільш ефективним як за критерієм продуктивності, так і за якістю формованої поверхні (мінімальне значення Ra = 0,206 мкм). 41 4.2. Дослідження впливу технологічних чинників на процес обробки блоків циліндрів Експериментальні дослідження проводилися на деталях масового виробництва – блоках циліндрів, виготовлених із чавуну марки Gh 190B (HRC 57). Параметри оброблюваного отвору становили: діаметр – 82 мм, довжина – 129 мм. Технічні вимоги до фінішної обробки передбачали похибку геометричної форми не більше 0,01 мм та шорсткість поверхні в діапазоні Ra = 0,2...0,8 мкм. На даному етапі випробувано широкий асортимент абразивного інструменту із синтетичних алмазів та кубічного нітриду бору (КНБ). Основними критеріями оцінки були обрані: продуктивність знімання металу (Q), питома витрата надтвердого матеріалу (НТМ) та параметри мікрорельєфу обробленої поверхні. Результати порівняльних випробувань брусків із КНБ (марка KP) та синтетичних алмазів (марка AC20) наведено в табл. 4.4. Таблиця 4.4. Порівняльні показники циклів хонінгування чавуну Gh 190B Номер циклу KP 80/63-M5-22-100% AC20 80/63-M5-22-100% Q, мкм/хв $\diamond\diamond$, мкм мет 18,0 36,0 1 17,0 34,0 2 18,0 36,0 3 16,5 33,0 5 17,5 35,0 7 17,0 34,0 10 Аналіз даних свідчить, що при використанні синтетичних алмазів спостерігається стрімке зниження різальної здатності вже після 1–5 хвилин роботи. Це пояснюється інтенсивним дифузійним зношуванням та адгезійним схоплюванням мікрочасток металу з алмазними зернами, що підтверджено 42 електронною мікроскопією. Процес мікрорізання трансформується у процес вигладжування, що унеможливорює виправлення геометричних похибок. Таблиця 4.5. Технологічні характеристики інструменту Характеристика Q, K, Ra, $\diamond\diamond$, $\diamond\diamond$, мет стм брусків мкм/хв мг/г мкм мкм мкм 17,0 34,0 2,0 0,8 0,301 KP 80/63-M5-22-100% 3,7 7,4 0,9 2,28 0,230 AC20 80/63-M5-22- 100% 15,0 30,0 2,3 2,6 0,187 KM 60/40-МД-50% 3,5 7,0 4,0 14,2 0,220 АСН 60/40-МД-50% Встановлено, що інструмент із кубічного нітриду бору (КНБ) володіє значно вищою термостійкістю та хімічною інертністю до залізовуглецевих сплавів. Це забезпечує стабільну продуктивність протягом усього періоду обробки. а б Рис. 4.2. Характер зношування різальних зерен (збільшення x2500): а) AC20 125/100 (інтенсивне засалювання та затуплення); б) KP 125/100 (збереження гострих крайок) З огляду на отримані результати, подальші дослідження растрового хонінгування чавунних блоків проводилися виключно з використанням брусків із КНБ, що дозволило виключити вплив нестабільності різальної здатності інструменту на кінцеві результати експерименту. 43 Проведені експерименти дозволяють комплексно оцінити можливості

вибраного інструменту: високу продуктивність, значний період стійкості, термостійкість та стабільність формування мікрорельєфу. Порівняльний аналіз металевих зв'язок показав, що зв'язка марки М5-22 є більш пластичною (

» Знайдено посилань: 0%

id: 18

«М'якою»

) порівняно з МД. Це зумовлює дещо вищі показники шорсткості при використанні брусків на зв'язці МД, що підтверджується даними, наведеними в табл. 4.6 (режими обробки: $\diamond\diamond = 0,5$ хв; $P = 0,8$ МПа; $\diamond\diamond = 21$ м/хв). хон різ Таблиця 4.6. Вплив характеристик брусків на базі КНБ на показники хонінгування Характеристика брусків Q , Ra , $\diamond\diamond$, $\diamond\diamond$, $\diamond\diamond$ мет стм т/т $см^3/см^2 \cdot хв$ мкм мкм мкм 14,0 0,35 2,2 1,0 0,135 КМ 40/28-М5-22-50% 15,0 0,38 4,3 2,6 0,187 КМ 60/40-МД-50% 15,0 0,38 2,2 1,0 0,180 КМ 60/40-М5-22-100% 17,0 0,40 2,0 0,8 0,301 КР 80/63-М5-22-100% 20,0 0,46 1,8 0,75 0,590 КР 125/100-М5-22-100% Для фінішних операцій хонінгування блоків циліндрів із чавуну Gh 190B було досліджено ефективність застосування брусків на еластичних (каучуковмісних) зв'язках типів P11 – P18T. У ході експерименту початкова шорсткість підтримувалася в діапазоні $Ra = 0,19 \dots 0,21$ мкм при часі обробки 60 с. Результати випробувань наведено в табл. 4.7. Таблиця 4.7. Залежність параметрів мікрорельєфу від типу еластичної зв'язки брусків Характеристика брусків ΔRa , мкм $\diamond\diamond\diamond\diamond$, мкм $\diamond\diamond\diamond\diamond$, мкм ср вих 0,116 0,013 0,190...0,210 АСМ 40/28-P18T-50% 0,105 0,014 0,190...0,210 АСМ 40/28-P11T-50% 0,115 0,014 0,190...0,210 АСМ 40/28-P14/P9-50% 0,119 0,013 0,190...0,210 АСМ 40/28-P11/P9-50% 44 Експериментально доведено, що зв'язки на полімерній основі забезпечують ідентичну швидкість обробки та високу однорідність мікросітки. Проте при вихідній шорсткості $Ra = 0,19 \dots 0,21$ мкм застосування брусків зернистістю АСМ 40/28 виявилось недостатнім для досягнення прецизійних значень ($Ra = 0,08 \dots 0,04$ мкм). Для оптимізації підбору інструменту було проведено дослідження впливу зернистості на базі зв'язки P11T, результати яких наведено в табл. 4.8. Таблиця 4.8. Вплив зернистості алмазного інструменту на кінцевий мікрорельєф Параметри алмазного $\diamond\diamond\diamond\diamond$, $\diamond\diamond$ (відхилення), $\diamond\diamond\diamond\diamond$, ср $\diamond\diamond$ вих інструменту мкм мкм мкм 0,0310 0,0072 0,12...0,15 АСМ 40/28-P11T-50% 0,0311 0,0040 0,12...0,15 АС4 50/40-P11T-50% 0,0516 0,0029 0,12...0,15 АС4 80/63-P11T-50% Аналіз даних табл. 4.8 свідчить, що найбільш стабільні результати досягаються при використанні інструменту зернистістю 40/28 та 50/40. Це дозволяє забезпечити необхідну якість поверхні прецизійних отворів при переході до завершальних етапів растрового хонінгування. Результати експериментів дозволяють зробити висновок, що інструмент із зернистістю 40/28 забезпечує найвищу якість мікрорельєфу на початкових етапах, проте його різальна здатність є недостатньою для ефективного виправлення похибок геометричної форми (макрогеометрії). Це зумовлено низькою інтенсивністю знімання припуску, що призводить до копіювання вихідних відхилень циліндричності. Оптимальним вибором для растрового хонінгування визначено абразивний інструмент марки АС4 50/40-P11T-50%. Даний інструмент забезпечує ефективне видалення припуску без спотворення геометричної форми отвору та формує 45 однорідну сітку мікроподряпин. Ефективність обробки суттєво корелює з налаштуваннями та режимами роботи обладнання (табл. 4.9). Таблиця 4.9. Оптимізація параметрів процесу за критерієм швидкості різання Q , $см^3/см^2 \cdot хв$ K , мг/г $\diamond\diamond$, м/хв $\diamond\diamond\diamond\diamond$, мкм $\diamond\diamond$, мкм $\diamond\diamond$, мкм різ ср мет стм 14 20,4 0,238 1,5 0,60 0,46 21 31,4 0,368 1,5 0,42 0,40 27 42,0 0,495 1,7 0,38 0,42 Встановлено, що при збільшенні швидкості різання спостерігається лінійне зростання продуктивності, проте відносно зношування надтвердого матеріалу (НТМ) при цьому має тенденцію до зниження. Растровий метод дозволяє реалізувати обробку на максимальних швидкостях без втрати якості поверхні. Вирішальний вплив на результати відновлення деталей має питомий тиск притискання брусків. Результати дослідження динаміки процесу при зміні тиску наведено в табл. 4.10. Таблиця 4.10. Вплив питомого тиску на показники растрового хонінгування (Бруски КР 80/63-М5-22-100%; $\diamond\diamond = 0,5$ хв; $\diamond\diamond = 27$ м/хв) хон різ P , МПа Q , $см^3/см^2 \cdot хв$ K , мг/г $\diamond\diamond$, мкм $\diamond\diamond$, мкм $\diamond\diamond\diamond\diamond$, мкм мет стм ср 0,4 10,0 0,280 1,5 0,95 0,270 0,8 17,0 0,408 2,0 0,80 0,301 1,0 20,0 0,460 2,3 0,78 0,320 1,2 29,8 0,680 4,0 1,20 0,493 46 Рис. 4.3. Залежність продуктивності знімання матеріалу від питомого тиску притискання брусків. Аналіз графіка на рис. 4.3 свідчить про близьку до лінійної залежність продуктивності від контактного тиску. Це пояснюється збільшенням глибини впровадження різальних зерен у матеріал заготовки. Даний режим сприяє стабільному мікрорізання та захищає інструмент від передчасного спрацювання до межі тиску в 1,0 МПа. При перевищенні цього значення спостерігається різке зростання питомої витрати абразиву та погіршення показників шорсткості поверхні. 4.3. Дослідження механізмів

формування мікрорельєфу та утворення задирок у процесі хонінгування У процесі фінішної обробки загартованих циліндричних поверхонь критичним показником якості є відсутність мікрозадинок у місцях перетину радіальних та центральних мікроканалів. Традиційні методи хонінгування часто призводять до деформаційного заповнення каналів металом. Поставлене завдання вимагало пошуку таких кінематичних режимів, які б мінімізували цей негативний ефект. 47 Для експерименту використовувалася восьмибрускова хонінгувальна головка діаметром 80 мм зі специфічною схемою базування: два бруски є нерухомими (базовими), а інші мають можливість радіального переміщення для створення необхідного питомого тиску. Бруски виготовлялися з робочим шаром на базі металосилікатної зв'язки М5-22 з додаванням кубічного нітриду бору (КНБ) або синтетичних алмазів. Порівняльні характеристики брусків наведено в описі методик, а результати впливу величини діаметрального зрізу на висоту мікрозадинок – у табл. 4.11. Таблиця 4.11. Вплив величини зрізаного шару на висоту мікрозадинок (h) (Режими: $\diamond\diamond = 21$ м/хв, $P = 0,8$ МПа) різ Метод хонінгування та Діаметральний h в отв. $\varnothing 3$ h в отв. $\varnothing 5$ характеристика брусків зріз, мкм мм, мкм мм, мкм 22 11,0 10,0 Традиційне (КР 80/63-М5-22) 40 16,5 17,5 62 23,0 24,0 22 11,0 15,0 Традиційне (АС15 80/63-М5- 40 20,5 30,0 22) 59 32,5 35,0 30 5,0 6,0 Растрове (КР 80/63-М5-22) 46 4,5 6,0 64 5,0 5,0 Дані таблиці 4.11 вказують на те, що при традиційному хонінгуванні збільшення об'єму знятого металу призводить до пропорційного росту мікрозадинок. Проте при використанні КНБ їх висота в 1,3–1,6 разу менша, ніж при застосуванні синтетичних алмазів, що пояснюється вищою різальною здатністю КНБ по загартованих матеріалах. Унікальність растрового хонінгування полягає у стабільності результату: висота задинок залишається мінімальною (4,5–6 мкм) незалежно від величини припуску завдяки постійній зміні напрямку руху різальних зерен. 48 Мікроскопічний аналіз структури задинок показав, що при традиційній обробці вони часто мають форму скрученої кульки (результат поперечного зминання). При растровому методі задирки мають значно слабший

Знайдено посилань: 0%

id: 19

«корінь»,

що полегшує їх видалення. Дослідження міцності та розмірів задинок наведено в табл. 4.12. Таблиця 4.12. Вплив абразиву та кінематики на параметри мікрозадинок Метод та Міцність, Міцність, h (отв. $\varnothing 3$ h (отв. $\varnothing 15$ характеристика брусків Н Н мм), мкм мм), мкм 11,0 2,15 10,0 1,76 Традиційне (КР 80/63) 23,0 5,88 24,0 3,82 11,0 6,66 15,0 8,23 Традиційне (АС 15) 32,5 10,2 35,0 9,11 5,0 0,44 6,0 0,64 Растрове (КР 80/63) 5,5 0,48 5,0 0,60 Аналіз підтверджує, що растровий метод з використанням КНБ забезпечує не лише мінімальну висоту задинок, а й їх найнижчу механічну міцність. Це свідчить про домінування процесів мікрорізання над пластичним деформуванням, що є ключовим для забезпечення високої якості внутрішніх циліндричних поверхонь при їх відновленні. Вплив зернистості інструменту на параметри шорсткості та висоту мікрозадинок досліджувався на загартованих сталях із застосуванням брусків на базі КНБ та синтетичних алмазів. Для забезпечення об'єктивності та незалежності експерименту всі випробування проводилися за ідентичних умов налагодження обладнання та режимів обробки. Результати використання інструменту різної зернистості наведено в табл. 4.13. Встановлено, що збільшення розміру абразивного зерна призводить до пропорційного зростання висоти мікрозадинок. Це пояснюється тим, що окремі зерна, які виступають над середнім рівнем робочої поверхні бруска, проникають у матеріал на більшу глибину, що ініціює інтенсивне пластичне витіснення металу на кромки. Таблиця 4.13. Вплив зернистості інструменту на шорсткість та висоту мікрозадинок Характеристика брусків h , мкм R_a , мкм $\diamond\diamond$, мкм мет КМ 20/14-М5-22-50% 31,0 4,0 0,086 КМ 40/28-М5-22-50% 43,0 7,5 0,150 КМ 60/40-М5-22-100% 45,0 10,0 0,260 КР 80/63-М5-22-100% 40,0 17,0 0,410 АСМ 60/40-М5-22-100% 39,0 12,0 0,150 АС15 80/63-М5-22-100% 40,0 25,0 0,480 Аналіз даних показує, що при однаковій зернистості інструмент на базі КНБ забезпечує дещо меншу висоту задинок порівняно з алмазним за рахунок кращої різальної здатності. Окремо було досліджено вплив питомого тиску на сталях 12ХН3А та 95Х18 (табл. 4.14). Таблиця 4.14. Вплив питомого тиску на продуктивність та якість поверхні Матеріал P , МПа h , мкм R_a , мкм $\diamond\diamond$, мкм мет 0,3 51,0 14,8 0,179 12ХН3А 0,6 48,0 13,5 0,220 1,0 56,0 14,0 0,242 0,3 51,0 14,9 0,233 95Х18 0,6 51,0 14,2 0,260 1,0 50,0 13,5 0,302 Порівняльна оцінка традиційного та растрового методів за критерієм висоти мікрозадинок (табл. 4.15) підтверджує перевагу растрової кінематики: навіть при максимальному тиску $P=1$ МПа висота задинок при растровому хонінгуванні є в 3,4 разу меншою, ніж при традиційному. 50 Таблиця 4.15.

Залежність висоти мікрозадинок (h) від величини тиску Метод та характеристика h (мкм) при $P=0,6$ $P=0,8$ $P=1,0$ брусків $P=0,2$ МПа МПа МПа МПа Традиційне (КР 80/63) 7,5 11,0 14,5 16,5 Растрове (КР 80/63) 2,5 3,9 4,4 4,8 Рис. 4.4. Графічна залежність висоти мікрозадинок від питомого тиску брусків. При стабільному напрямку руху інструменту (традиційне хонінгування) кромка радіального отвору, яка є попутною, накопичує значну кількість деформованого металу. Растрова траєкторія за рахунок реверсивного характеру руху постійно змінює вектор сили різання відносно кромок, що нівелює цей ефект. У випадках, коли довжина оброблюваної поверхні співвідноситься з довжиною інструменту, растрове хонінгування доцільно проводити без осьової подачі ($\phi\phi = 0$). Режими обробки при цьому встановлювалися на рівні: $\phi\phi = 22$ ос різ 51 м/хв; тиск $P=0,6...1,0$ МПа для розмірного хонінгування та $P=0,6...0,8$ МПа для чистового. Схема такої траєкторії для контрольних кілець наведена на рис. 4.5. Рис. 4.5. Растрова траєкторія робочого руху без осьової подачі при хонінгуванні прецизійних кілець. 4.4. Комплексна оцінка показників продуктивності та якості при багатостадійному хонінгуванні Ефективність розробленого методу оцінювалася за сукупністю показників: продуктивністю знімання металу (Q), параметрами мікрорельєфу (Ra) та точністю геометричної форми. Оскільки початкова похибка форми після шліфування в експериментальних кільцях ($\phi 35$ мм) становила понад 30 мкм при шорсткості $Ra = 0,6...1,2$ мкм, досягнення технічних вимог ($Ra = 0,025$ мкм, похибка форми 2 мкм) потребувало двостадійної обробки. Дослідження проводилися за схемою

» Знайдено посилань: 0,01%

id: 20

«жорстка хонінгувальна головка – плаваюча деталь».

На першому етапі здійснювалося розмірне хонінгування для інтенсивного видалення припуску та виправлення макрогеометрії. Результати випробувань різних типів інструменту наведено в табл. 4.16 та 4.17. 52 Таблиця 4.16. Порівняння продуктивності та шорсткості при розмірному хонінгуванні (Режими: $P = 0,8$ МПа, $\phi\phi = 22$ м/хв) різ Характеристика брусків Продуктивність $\phi\phi$, Шорсткість $\phi\phi\phi\phi$, ср ср мкм/хв мкм 36 0,32 АС6 63/50 - М2-01 - 100% 40 0,15 КМ 60/40 - М2-01 - 100% 44 0,12 КМ 40/28 - М5-22 - 50% Експериментально доведено, що використання КНБ дозволяє досягти вищої продуктивності навіть при меншій зернистості інструменту порівняно з синтетичними алмазами. Аналіз стабільності різальної здатності (табл. 4.17) підтверджує, що через хімічну спорідненість алмазу із залізом на зернах миттєво формуються фаски зношування, що призводить до стрімкого падіння продуктивності вже після 3-го циклу. Таблиця 4.17. Динаміка продуктивності (Q , мкм/хв) за циклами обробки Характеристика Цикл Цикл Цикл Цикл Цикл Цикл бруска 1 2 3 4 5 6 7 8 88 61 32 47 25 12 12 11 АС6 63/50-М2-01 58 36 51 44 37 40 22 35 КМ 60/40-М2-01 55 45 45 37 52 31 40 46 КМ 40/28-М5-22 Для досягнення фінальної шорсткості $Ra = 0,025$ мкм після розмірного етапу застосовувалося чистове (фінішне) хонінгування на еластичних (полімерних) зв'язках при тиску $P = 0,6...0,8$ МПа. Встановлено, що при використанні пружних брусків макрогеометрія деталі практично не змінюється, проте значне перевищення часу обробки (60 с) або тиску (1,0 МПа) може призвести до небажаного завалу (скруглення) кромок отворів. 53 Таблиця 4.18. Вплив характеристик фінішних брусків на шорсткість (Режими: $\phi\phi = 30$ с; $P = 0,8$ МПа, $\phi\phi = 22$ м/хв) хон різ Характеристика брусків Шорсткість Ra ср, мкм 0,040 АСМ 40/28 - Р9/Р4 - 25% 0,027 АСМ 28/20 - Р11 - 50% 0,022 АСМ 20/14 - Р9 - 25% Найкращі результати забезпечує інструмент зернистістю 20/14 на зв'язці Р9, що дозволяє стабільно отримувати шорсткість на рівні $Ra = 0,022...0,025$ мкм. Бруски на більш зносостійкій зв'язці Р11Т вимагають більшого часу обробки для досягнення аналогічних показників. Рис. 4.6. Порівняння мікропрофілю після розмірного (КМ 40/28) та чистового хонінгування (АСМ 40/28-Р9/Р4) 54 Каср=0,022 мкм, Чистове хонінгування $\phi\phi = 0,33$ мкм чистове хонінгування $\phi\phi\phi\phi\phi\phi\phi$ АСМ 20/14- Р9- 25%Тхон=30 сек АСМ 28/20- Р11- 50% Рис. 4.7. Фінішний стан поверхні ($Ra = 0,022$ мкм) після чистового хонінгування брусками АСМ 20/14-Р9-25% 55 РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ РАСТРОВОМУ ХОНІНГУВАННІ 5.1. Аналіз впливу параметрів технологічної системи на точність геометричної форми циліндрів У даному розділі досліджуються закономірності формоутворення циліндричних поверхонь при растровому хонінгуванні в контексті забезпечення заданих параметрів макро- та мікрорельєфу. Процес формоутворення є результатом синергетичної дії технологічних, кінематичних та динамічних чинників. Встановлення взаємозв'язку між об'ємом знятого металу в кожній точці твірної та параметрами процесу дозволяє прогнозувати та прецизійно керувати якістю обробки. Основними чинниками, що детермінують точність геометричної форми при використанні надтвердих абразивів, є: 1. Характер відносного

кінематичного руху інструменту. 2. Технологічна жорсткість системи

Знайдено посилань: 0%

id: 21

«верстат-приспосовування-інструмент- деталь»

(В ПІД). 3. Точність базування та налагодження обладнання. 4. Вихідна геометрична похибка інструменту. Кінематична особливість растрового руху полягає у поєднанні складних коливальних траєкторій різальних зерен з круговою () та зворотно-кріпильною () подачами. Оскільки лінійні швидкості подач є значно меншими за швидкість різання, час контакту інструменту з різними ділянками поверхні по довжині циліндра є нерівномірним. Ця нерівномірність залежить від масштабних геометричних параметрів: співвідношення довжини отвору (), довжини брусків (), величини ходу () та перебігу (). бр х п 56 Вважаючи, що об'єм зрізаного матеріалу за інших рівних умов прямо пропорційний тривалості контакту інструменту з поверхнею, точність профілю поздовжнього перерізу безпосередньо залежить від параметрів зворотно-поступального руху. Розглянемо два основні варіанти кінематичної взаємодії: Варіант 1: Повний вихід інструменту з отвору (рис. 5.1). У цьому випадку кожен поперечний переріз циліндра контактує з брусками однаково довгий час: бр = (5.1) ос за умови константи швидкості . Такий спосіб забезпечує теоретично ідеальну прямолінійність твірної, проте на практиці при хонінгуванні застосовується рідко через небезпеку пошкодження країв отвору та нестабільність положення хонінгувальної головки. Рис. 5.1. Схема абразивної обробки при повному виході інструменту за межі отвору. Варіант 2: Частковий перебіг (неповний вихід) брусків (рис. 5.2). Цей варіант передбачає фіксований хід інструменту, при якому траєкторія обробки реалізується лише частиною довжини брусків за межами торців деталі. 57 Рис. 5.2. Схема контактування брусків при неповному виході з отвору та графік розподілу часу контакту Для розрахунку часових інтервалів при растровому хонінгуванні використано методику, адаптовану з теорії прецизійної доводки поверхонь. Досліджено два режими обробки при встановленій швидкості : ос а) - забезпечує інтенсивніше виправлення похибок у центральній частині; б) - режим, характерний для обробки коротких отворів. бр Експериментально доведено, що при роботі брусками на металевих та полімерних зв'язках фактичне знімання металу по довжині твірної практично повністю корелює з теоретичним графіком тривалості контакту (рис. 5.2). Це дозволяє шляхом регулювання величини перебігу () ефективно компенсувати такі дефекти, як бочкоподібність, конусність або седлоподібність циліндрів. Розглянемо випадок, коли довжина ходу інструменту перевищує довжину брусків (рис. 5.2) за умови рівності величин перебігу на обох торцях (= бр п1) та постійної швидкості осьової подачі (). Графік тривалості контакту п2 ос бруска з поверхнею у такому разі має вигляд ламаної лінії (a-b-c-d) і змінюється залежно від координати по довжині осі циліндра. Максимальна тривалість контакту спостерігається у середній частині циліндра: 1 58 бр = (5.2) 1 ос Тривалість контакту на краях циліндра є функцією величини перебігу 2 інструменту: п = (5.3) 2 ос При хонінгуванні з перебігом фактична площа контакту інструменту з поверхнею на краях циліндра зменшується. За умови стабільного зусилля розтискання це призводить до зростання питомого тиску, що інтенсифікує знімання металу на кромках. Зміна тиску вздовж осі враховується за допомогою коефіцієнта К, який є асиметричним відносно величини перебігу [33]. Різниця пб у часі роботи інструменту між центральною частиною та краями з урахуванням динаміки тиску дозволяє розрахувати необхідний час затримки () зворотно-поступального руху в точках реверсу: - бр п = (5.4) 3 * К ос пб Випадок, коли , характерний для обробки

Знайдено посилань: 0%

id: 22

«глухих»

отворів або за бр обмеженого виходу інструменту. У цій ситуації максимальний час контакту визначається як / , а розрахунковий час затримки в точках реверсування ос обчислюється аналогічно з урахуванням обмеженого ходу. Теоретичні залежності були перевірені експериментально на установці

Знайдено посилань: 0%

id: 23

«Растр-Ц20»

при обробці деталей із чавуну Gh 190B та сталі 12ХН3А. Умови дослідження: жорстке закріплення деталі, плаваюча хонінгувальна головка з 8 брусками (довжина брусків – 150

мм, характеристика KM 40/28-M5-22-50%, $\varnothing = \varnothing 38$ мм, $\varnothing = 10$ мм). Параметри головного руху: $\varnothing = 133 \text{ с}^{-1}$, $A = 3,14$ мм; $p 1 \varnothing = 114 \text{ с}^{-1}$, $B = 2,6$ мм. 2 Результати досліджень (рис. 5.3) підтверджують високу збіжність із теоретичними моделями: 59 $\square$ При затримці в точках реверсу $\varnothing \leq 0,2$ $\varnothing$ формується бочкоподібність 3 (відхилення 4–5 мкм). $\square$ При збільшенні затримки до 2,5...3,0 с виникає сідлоподібність (відхилення 4–5 мкм). $\square$ Оптимальний розрахунковий час витримки склав 1,14 с. При фактичній затримці 1,2 с була досягнута стабільна геометрична форма з відхиленням не більше 1,5 мкм. $\square$ Рис. 5.3. Вплив часу затримки осьової подачі на відхилення профілю поздовжнього перерізу Дослідження впливу кругової подачі (рис. 5.4) показало, що при її збільшенні до 45 об/хв ($\varnothing = 23,6$ мм/с) спостерігається осциляція похибки кр циліндричності. 60 Рис. 5.4. Вплив кругової подачі на відхилення від круглості Таким чином, растрове хонінгування шляхом точного регулювання параметрів осьової та кругової подач (зокрема часу затримки в точках реверсу) є найбільш ефективним методом керування точністю циліндричних отворів. Складний характер траєкторії з перетином слідів без зміни напрямку головного руху забезпечує рівномірне зношування брусків та високу стійкість інструменту. 5.2. Дослідження технологічних особливостей хонінгування циліндричних поверхонь для підвищення точності обробки Даний етап досліджень спрямований на виявлення впливу основних технологічних налаштувань на параметри макрогеометрії циліндрів. Зокрема, вивчено вплив співвідношення довжини брусків до довжини отвору, а також ефективність методу взаємної правки при двосторонній обробці. При хонінгуванні прецизійних отворів, довжина яких близька до довжини інструменту, діапазон налаштування осьового ходу ($\varnothing$) та величини перебігу ($\varnothing$) $\varnothing$ є суворо обмеженим. Експериментальні дані щодо впливу співвідношення геометричних параметрів наведено в табл. 5.1. 61 Таблица 5.1. Вплив співвідношення довжин брусків та отвору на точність форми Співвідношення $\varnothing / \varnothing$, $\varnothing$, $\varnothing$, $\varnothing$, $\varnothing$, $\varnothing$, бр отв одерж отв хон мет почат мм хв мкм мкм мкм 0,50 35 1,5 60 4,5 2,5 0,83 35 0,5 20 4,0 0,8 Як свідчать дані таблиці, збільшення відносної довжини брусків ($\varnothing / \varnothing = \text{бр отв } 0,83$) дозволяє суттєво підвищити точність форми: отримана похибка зменшується до 0,8 мкм. Схема контактування інструменту при обробці прецизійних контрольних кілець наведена на рис. 5.5. Рис. 5.5. Схема налагодження при хонінгуванні контрольного кільця (кінематику процесу детально описано у розділі 4). У практиці обробки коротких отворів розмір перебігу інструменту ($\varnothing$) $\varnothing$ зазвичай встановлюють на рівні 1/3 довжини бруска ($\varnothing$). Перевищення цього бр значення призводить до

» Знайдено посилань: 0%

id: 24

«розвалу»

(збільшення діаметра) отвору біля його країв. Навпаки, недостатній осьовий хід спричиняє локалізацію контакту: бруски 62 взаємодіють лише з крайовими зонами отвору в моменти реверсу, що веде до нерівномірного знімання металу, інтенсивного спрацювання інструменту та копіювання вихідної похибки форми. Для радикального підвищення точності було застосовано метод взаємної правки (рис. 5.6). Рис. 5.6. Схема хонінгування за методом взаємної правки при перевороті деталі Технологічний цикл хонінгування в такому разі поділяється на підперіоди ($\varnothing = \varnothing + \varnothing + \dots \varnothing$), протягом яких обробка здійснюється з переворотом хон 1 2 $\varnothing$ деталі на 180°. Це забезпечує: $\square$ рівномірність контакту робочої поверхні брусків по всій твірній отвору; $\square$ нівелювання вихідних погрешностей макрогеометрії; $\square$ підвищення точності самої робочої поверхні брусків ($\varnothing$), що знижує вимоги до точності виготовлення самого інструменту. Крім того, при двосторонньому хонінгуванні мінімізується вплив похибок налагодження верстата та нерівномірності перебігів на різних торцях. Даний метод є максимально ефективним у випадках, коли довжина отвору дорівнює довжині брусків, що дозволяє досягати стабільних метрологічних показників. Даний спосіб обробки було апробовано на отворах діаметром $\varnothing = 18$ мм. Експеримент проводився шляхом одночасного хонінгування пакета з двох кілець при жорсткому закріпленні хонінгувальної головки. Варто зауважити, що при 63 серійному виробництві доцільно використовувати інструмент із шарнірним закріпленням для компенсації відхилень, проте в умовах експерименту жорстка схема дозволила чіткіше відстежити механізм виправлення похибок. При однобічній обробці отвору спостерігається часткове копіювання геометричних відхилень самої хонінгувальної головки на поверхню

» Знайдено посилань: 0%

id: 25

«взаємна правка»

деталі (рис. 5.7, а; 5.8, а). У такому разі залишкова похибка форми (переважно конусоподібність) становить 1,5...1,8 мкм. Використання методу взаємної правки передбачає поділ циклу на два підперіоди. У першому підперіоді (♦♦) видаляється основний припуск. Після 1 розвороту деталі на 180° (другий підперіод ♦♦) час обробки розраховується 1 виходячи з величини залишкової похибки Δ та швидкості знімання металу Q пр (мкм/хв). Розрахунковий час для другого етапу можна визначити за залежністю: 2Δ пр ♦♦ = (хв) (5.5) 2 ♦♦ Рис. 5.7. Результати виправлення похибок (бруски КМ40/28-М5-22- 50%): а) хонінгування без перевероту ($\Delta = 1,5$ мкм); б) хонінгування з взаємною правкою (мінімізація похибки). У кожному експерименті профілограми та круглограми реєструвалися двічі: після етапу розмірного хонінгування жорсткими брусками та після фінішної обробки еластичним інструментом. 64 Рис. 5.8. Порівняння точності при обробці

» Знайдено посилань: 0%

id: 26

«паке́том»

деталей: а) без перевероту ($\Delta = 1,8$ мкм); б) з методом взаємної правки ($\Delta = 0,8$ мкм). пр пр Аналіз результатів доводить, що метод взаємної правки є ефективним незалежно від виду вихідних похибок (овальність, конусність тощо). Це дозволяє зробити важливий технологічний висновок: операцію попереднього шліфування отворів у процесі відновлення деталей можна ефективно замінити попереднім хонінгуванням. Така заміна не потребує додаткового обладнання – достатньо використати ту саму установку для растрового хонінгування, змінивши лише характеристики абразивних брусків. Це суттєво спрощує технологічний процес та знижує собівартість відновлення за одночасного підвищення точності до рівня 0,8...1,0 мкм. 5.3. Закономірності формування мікрорельєфу та методи керування його параметрами У процесі хонінгування відбувається нівелювання вихідної шорсткості та формування нового мікрорельєфу, параметри якого детерміновані режимами 65 обробки. При растровому хонінгуванні загальні закономірності впливу технологічних чинників на мікрогеометрію є схожими з традиційним методом, де домінуючим параметром залишається зернистість абразиву: висота мікронеровностей зростає пропорційно розміру зерен. При цьому швидкість різання та питомий тиск (у межах встановленого робочого діапазону) не чинять суттєвого впливу на параметр R_a . Проте растрова кінематика надає додаткові можливості керування якістю поверхні через зміну щільності (q) та кута сітки мікроподряпин. Встановлено, що в діапазоні кутів 30°... 60° суттєвої зміни шорсткості не спостерігається. Однак при наближенні кута сітки до 0° мікрорельєф значно зростає при одночасному падінні продуктивності. Ізотропність структури поверхні (однаковість властивостей у різних напрямках) досягається при співвідношенні амплітуд коливаль $B/A \approx 1$. Результати дослідження впливу щільності сітки (q) на параметри шорсткості (R_a) та середньоквадратичне відхилення (♦♦ R_a) для брусків різної зернистості (КР 80/63 та КМ 40/28) наведено в табл. 5.2 та 5.3. Матеріал дослідження – чавун Gh 190B (HRC 57). Таблиця 5.2. Вплив щільності сітки (q) на параметри шорсткості (бруски КР 80/63-М5- 22-100%) Параметр $q=0,06$ $q=0,1$ $q=0,3$ $q=0,7$ $q=1,0$ $q=3,0$ 0,2400 0,2200 0,2000 0,1710 0,1600 0,1500 R_a , мкм 0,0245 0,0225 0,0180 0,0160 0,0150 0,0135 ♦♦ R_a , мкм 66 Таблиця 5.3. Вплив щільності сітки (q) на параметри шорсткості (бруски КМ 40/28-М5- 22-50%) Параметр $q=0,06$ $q=0,1$ $q=0,3$ $q=0,7$ $q=1,0$ $q=3,0$ 0,150 0,146 0,130 0,124 0,110 0,105 R_a , мкм 0,009 0,007 0,006 0,006 0,005 0,005 ♦♦ R_a , мкм Рисунок 5.9. Залежність параметрів шорсткості від щільності сітки при растровому хонінгуванні. Аналіз отриманих результатів (рис. 5.9) підтверджує, що щільність сітки траєкторії руху інструменту є ефективним важелем впливу на якість поверхні. Зі збільшенням щільності значення R_a та його розсіювання (♦♦ R_a) лінійно зменшуються, що забезпечує високу однорідність мікрорельєфу. Основною перевагою растрового методу хонінгування є можливість гнучкого технологічного забезпечення заданих параметрів шорсткості шляхом корекції траєкторії (кута та щільності сітки). Це дозволяє виготовляти прецизійні циліндричні поверхні з мінімальними похибками геометричної форми при стабільно високій інтенсивності процесу. 67 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ Проведене комплексне дослідження, присвячене підвищенню якості та ефективності обробки внутрішніх циліндричних поверхонь блоків циліндрів ДВЗ, дозволяє стверджувати, що впровадження растрової кінематики є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасного фінішного машинобудування. Аналіз існуючих методів фінішної обробки показав, що традиційне хонінгування та шліфування в умовах сучасних вимог до екологічності та ресурсу двигунів часто вичерпують свій технологічний потенціал, не забезпечуючи необхідної стабільності

мікрорельєфу та відсутності дефектних шарів. У ході теоретичного обґрунтування було доведено, що головною перевагою растрового методу є створення траєкторії

Знайдено посилань: 0%

id: 27

"растрової циклоїди",

яка формується в результаті складного накладання частотних коливань. Математичне моделювання процесу підтвердило, що така кінематика забезпечує рівномірне покриття всієї оброблюваної поверхні сіткою мікроканалів, що перетинаються під оптимальними кутами. Це не лише інтенсифікує процес знімання металу, а й докорінно змінює механізм взаємодії абразивного зерна з матеріалом: замість односпрямованого тиску відбувається багатовекторне мікрорізання, що мінімізує пластичну деформацію та теплонапруженість у зоні контакту. Експериментальна частина роботи, проведена на базі чавунних блоків [Gh 190B](#), виявила критичну роль вибору абразивного матеріалу. Встановлено, що використання кубічного нітриду бору (КНБ) на металосилікатних та еластичних зв'язках є технологічно виправданим кроком. На відміну від синтетичних алмазів, які вступають у дифузійну реакцію з залізом за високих локальних температур, КНБ зберігає гостроту різальних крайок протягом тривалого часу. Це дозволило досягти стабільної продуктивності обробки на рівні 33–45 мкм/хв, що у два рази 68 перевищує показники традиційних схем, при одночасному зниженні питомої витрати надтвердого матеріалу. Особливу увагу в роботі приділено керуванню макрогеометрією. Дослідження впливу часу затримки інструменту в точках реверсу ( ) стало з ключем до вирішення проблеми бочкоподібності та конусності отворів. Розраховане значення затримки у 1,2 секунди, підтверджене практичними замірами на установці

Знайдено посилань: 0%

id: 28

«Растр-Ц20»,

дозволило виправляти вихідні похибки шліфування до рівня 1,5 мкм. Це доводить, що растрова траєкторія володіє значно вищим виправляючим потенціалом, ніж класична осциляція, оскільки дозволяє більш точно дозувати час контакту абразиву з різними ділянками твірної циліндра. Якість сформованого мікрорельєфу після фінішного етапу растрового хонінгування брусками зернистістю 20/14 на еластичній зв'язці P9 показала унікальні результати: параметр шорсткості [Ra](#) стабілізувався на позначці 0,022–0,025 мкм. Створена таким чином ізотропна поверхня з мережею каналів, що утримують мастило, є ідеальним дзеркалом циліндра, яке забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя в парі

Знайдено посилань: 0%

id: 29

"поршневе кільце – гільза".

Дослідження структури мікрозадирок під електронним мікроскопом підтвердило, що растрова траєкторія практично повністю усуває проблему

Знайдено посилань: 0%

id: 30

"кореня задирки",

роблячи краї радіальних отворів чистими та стійкими до викришування в процесі експлуатації двигуна. Практична значущість роботи підкріплена пропозицією щодо модернізації технологічних ліній типу

Знайдено посилань: 0%

id: 31

«[Nagel](#)».

Метод взаємної правки (хонінгування з переворотом деталі), описаний у роботі, дозволяє виключити операцію попереднього шліфування з технологічного ланцюжка. Це веде до суттєвої економії енергоресурсів, скорочення виробничих площ та зменшення кількості одиниць необхідного обладнання. Крім того, зниження вимог до вихідної точності інструменту за рахунок його самовирівнювання в процесі взаємної 69 правки робить технологію доступною для широкого впровадження на підприємствах з відновлення та ремонту техніки. Підсумовуючи, можна стверджувати, що розроблений та апробований метод растрового хонінгування є цілісним технологічним рішенням, яке інтегрує в собі переваги високої продуктивності, прецизійної точності та бездоганної якості поверхні. Результати дослідження відкривають нові можливості для вітчизняного машинобудування у створенні конкурентоспроможних двигунів із подовженим ресурсом, а теоретичні залежності, виведені в роботі, можуть служити базою для подальших наукових пошуків у

сфері фінішної обробки прецизійних деталей машин. Запропоновані режими обробки та характеристики інструменту рекомендуються до впровадження у серійне виробництво як такі, що забезпечують гарантований економічний ефект та високу культуру виробництва. 70 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 1. Пасічник В. А. Математичне моделювання процесів абразивної обробки : навч. посіб. Житомир : ЖДТУ, 2012. 240 с. 2. Грабченко А. І., Федорович В. О., Пилипенко О. І. Проектування та експлуатація абразивного інструменту : підручник. Харків : НТУ

” Знайдено посилань: 0%

id: 32

«ХПІ»,

2010. 344 с. 3. Кальченко В. В. Технологічне забезпечення якості та точності обробки поверхонь тертя при шліфуванні та хонінгуванні. Чернігів : ЧДТУ, 2008. 192 с. 4. Железнов Ю. О., Борисенко В. І. Кінематика та динаміка прецизійного хонінгування отворів у загартованих деталях машин. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 2 (73). С. 45–52. 5. Петраков Ю. В. Розрахунок траєкторій руху при алмазно-абразивній обробці деталей машин. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент . 2014. Вип. 15. С. 112–119. 6. Технологія машинобудування : підручник / М. С. Наерман та ін. ; за ред. П. І. Ящерицина. Київ : Вища школа, 2006. 543 с. 7. Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем : підручник. Київ : ТОВ

” Знайдено посилань: 0%

id: 33

«Кондор»,

2017. 320 с. 8. Мельничук П. П. Надійність та зносостійкість інструментів з надтвердих матеріалів. Житомир : ЖДТУ, 2004. 216 с. 9. Палій О. Г. Оптимізація параметрів шорсткості дзеркал циліндрів ДВЗ при хонінгуванні брусками з КНБ. Наукові нотатки. 2018. Вип. 61. С. 124–129. 10. Степанов М. С., Драгобецький В. В. Формування мікрорельєфу поверхонь деталей при обробці вільним та закріпленим абразивом. Прогресивні технології і системи машинобудування. 2016. Вип. 1 (53). С. 110–117. 71 11. [Nagel Mechanical Engineering. Precision Honing Systems: Technology Guide. Nürtingen : Nagel GmbH, 2019. 156 p.](#) 12. [Goettsch D., Klocke F. Innovative Honing Processes for High-Efficiency Engine Production. Manufacturing Technology. 2021. Vol. 70, Issue 1. P. 285–308.](#) 13. Струтинський В. Б. Математичне моделювання технологічних процесів : навч. посіб. Житомир : ЖДТУ, 2011. 232 с. 14. Механічна обробка металів : довідник / за ред. П. П. Мельничука. Київ : Техніка, 2005. 480 с. 15. [DSTU 8302:2015. Information and documentation. Bibliographic record. Bibliographic description. General principles and rules of composition. Kyiv : SE](#)

” Знайдено посилань: 0%

id: 34

"UkrNDNC",

2016. 17 p. ([National Standard of Ukraine](#)). 16. [ISO 1101:2017. Geometrical product specifications \(GPS\) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva : ISO, 2017. 142 p.](#)

Відмова від відповідальності:

Цей звіт повинен бути правильно інтерпретований та проаналізований кваліфікованою особою, яка несе відповідальність за оцінку!

Будь -яка інформація, наведена у цьому звіті, не є остаточною та підлягає ручному огляду та аналізу. Дотримуйтесь вказівок: [Рекомендації з оцінки](#)

Детектор Плагіату - Право знати автора! ☐ SkyLine LLC