

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД
«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 «Професійна освіта»
освітньо-професійна програма «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)

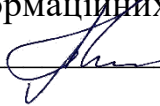
Лубни – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД
 «ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА»
 ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

КАФЕДРА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ
 РЕСТОРАННОГО І ТУРИСТИЧНОГО БІЗНЕСУ

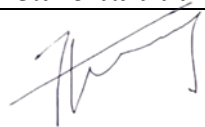
Затверджую:

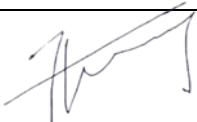
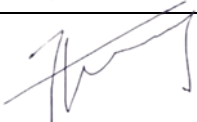
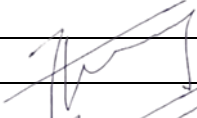
Декан факультету технологій та
 інформаційних систем

 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 «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.

<i>№</i>	<i>Заходи</i>	<i>Термін виконання</i>	<i>Відмітка про виконання</i>
1.	Вибір теми кваліфікаційної роботи, вивчення наукової літератури, затвердження теми й керівника.	10.10.2025	
2.	Розробка плану роботи, визначення мети, завдань, об'єкту, предмету, методів дослідження.	14.11.2025	

3.	Робота над теоретичною частиною кваліфікаційної роботи, аналіз літературних джерел.	05.12.2025	
4.	Подання теоретичної частини кваліфікаційної роботи для першого читання науковим керівником.	19.12.2025	
5.	Усунення зауважень, урахування рекомендацій наукового керівника, подання теоретичної частини кваліфікаційної роботи на друге читання.	16.01.2026	
6.	Розробка технологічної і конструкторської частин роботи. Поетапний аналіз та обговорення результатів дослідної роботи.	30.01.2026	
7.	Подання першого варіанта дослідної частини кваліфікаційної роботи на перевірку науковому керівникові.	20.02.2026	
8.	Урахування рекомендацій наукового керівника, збагачення роботи додатковими дослідженнями, проведеними під час практики, підготовка варіанта роботи до попереднього захисту роботи на кафедрі.	06.03.2026	
9.	Попередній захист роботи на кафедрі.	20.03.2026	
10.	Доопрацювання кваліфікаційної роботи з урахуванням рекомендацій після попереднього захисту роботи на кафедрі.	03.04.2026	
11.	Подання кваліфікаційної роботи науковому керівникові та рецензентові на підготовку відгуку й рецензії.	17.04.2026	
12.	Подання на кафедру остаточного варіанта кваліфікаційної роботи, підписаного випускником, науковим керівником і рецензентом.	08.05.2026	

Здобувач вищої освіти _____ **Маруняк В. Б.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Потапенко Е. В.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

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 «пакетом». 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 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. Вимірjuвальню-діагностичний комплекс МФК 500 для проведення прецизійних вимірjuвань	31
3.2. Методологія дослідження мікрорельєфу та параметрів шорсткості робочих поверхонь.....	36
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ РАСТРОВОГО ХОНІНГНУВАННЯ	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 ХОНІНГУВАННІ	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

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 «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

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 «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 (знизити 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

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

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.

Вибір характеристик інструменту (алмазних чи ельборових брусків) здійснюється на основі аналізу властивостей заготовки та вимог до параметрів шорсткості [1, 76, 94, 109]. Раціональний 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

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. Бабичева, попри відмінності у режимах взаємодії абразиву з поверхнею, механізм руйнування має спільні риси зі звичайним зношуванням матеріалів. Водночас В. Н. Кащеев зазначає, що ступінь закріплення зерен радикально змінює характер їхньої дії на метал: жорстко зафіксоване зерно та вільний абразив діють за різними фізичними моделями.

На основі експериментальних даних Н. І. Богомолва, інтенсивність деструкції металу q залежно від питомого тиску хонінгування описується залежністю:

$$q = C \cdot p^{m_0} \quad (1.1)$$

де:

- C – коефіцієнт, що враховує умови обробки;
- p – питомий тиск у зоні контакту, МПа;
- m_0 – показник ступеня, що характеризує спосіб фіксації абразиву.

Для жорстко закріплених зерен (алмазні бруски) значення $m_0 \approx 1,0$, тоді як при роботі незакріпленим абразивом цей показник знижується до $0,7 \dots 0,8$.

Механізм взаємодії інструменту з поверхнею визначається відношенням глибини занурення зерна k до радіуса закруглення його вершини s :

- при $k/s < 0,02$ спостерігається суто пружне відтиснення;
- при $0,02 < k/s < 0,5$ відбувається пластичне деформування;
- при $k/s > 0,5$ реалізується безпосередньо мікрорізання.

Кількість циклів взаємодії, необхідних для руйнування матеріалу, при пружному контакті становить $10^5 \dots 10^7$, при пластичному – $10^2 \dots 10^3$, 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 $1,0 \dots 1,5$ мкм.

Фізико-хімічні аспекти обробки проявляються у формуванні оксидних плівок та адсорбційних шарів. Використання у складі МОР поверхнево-активних

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 мікроряпання. 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: «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:

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:

- площу пружного та пластичного контакту абразивних часток;
- кількість активних (ріжучих) зерен;
- 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

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;

- 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 алмазоносного шару на 50% [33, 34]. Щільність та характер розподілу мікроподряпин (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.

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.

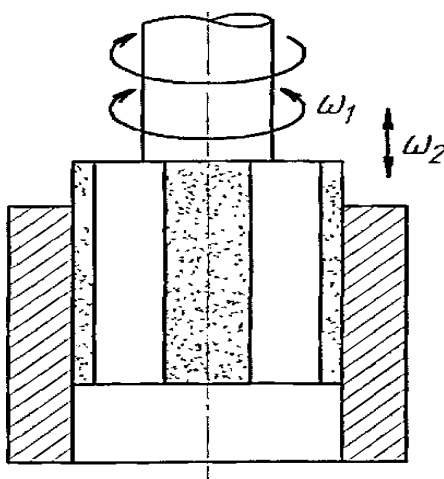


Рис. 2.1. Кінематика елементарної динаміки під час хонінгування з растровим рухом. 1. – окружне обертання інструменту 2. – поздовжнє переміщення інструменту)

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).

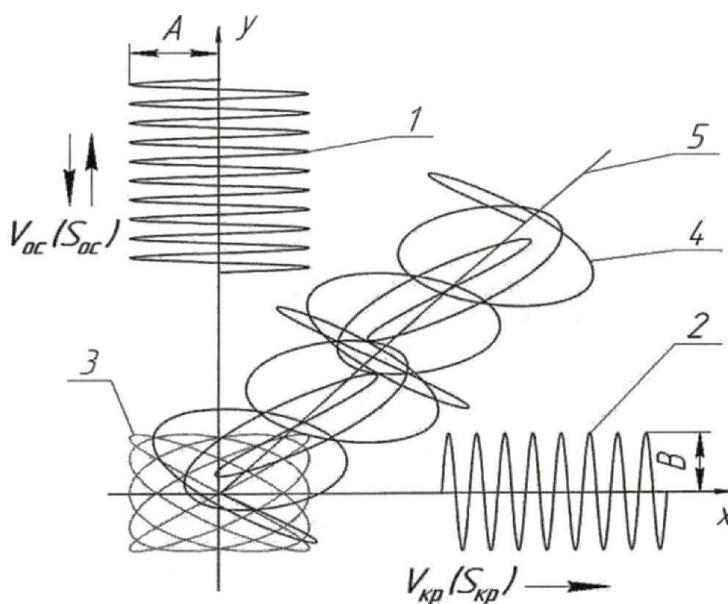


Рис. 2.2. Послідовність утворення траєкторії різального зерна. 1. амплітуда A в осьовому переміщенні 2. амплітуда B в круговому переміщенні 3. траєкторія переміщення точки в традиційному хонінгуванні 4. Траєкторія переміщення точки в растровому хонінгуванні 5. Подовжня вісь циліндра.

Ключова особливість растрового хонінгування полягає в тому, що головний рух різання є результатом суперпозиції двох синусоїдальних коливань із різними частотами ω_1 , ω_2 та амплітудами A і B , що діють у взаємно перпендикулярних напрямках (осьовому та тангенціальному).

Для рівномірного розподілу сітки мікроподряпин (растра) по всій поверхні деталі до коливальних рухів додаються вектори швидкості осциляції V_{oc} та кругової подачі V_{kp} . В результаті такої кінематичної взаємодії траєкторія руху

хонінгувальної головки формує складну криву, яку доцільно класифікувати як «растрову циклоїду».

Положення точки на поверхні циліндра в будь-який момент часу t описується параметричними функціями координат:

$$x = f_1(t); \quad y = f_2(t); \quad z = f_3(t) \quad (2.1)$$

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:

$$\begin{cases} X = A * \sin(\omega_1 t + \varphi_0) + V_{кр} * t \\ Y = B * \sin(\omega_2 t) + V_{ос} * t \end{cases} \quad (2.2)$$

де:

- A, B – амплітуди осьових та кругових коливань відповідно;
- ω_1, ω_2 – циклічні частоти коливань;
- φ_0 – початковий зсув фаз;
- $V_{кр}, V_{ос}$ – швидкості кругової та осьової подачі.

Без урахування переносних рухів ($V_{кр}, V_{ос}$) траєкторія являє собою замкнену фігуру Ліссажу, вписану в прямокутник зі сторонами $2A \times 2B$. Періоди коливань визначаються як:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}, \quad T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \quad (2.3)$$

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

(S_{oc}) та кругової ($S_{кр}$) подач на геометричну точність та формування 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 $\psi = \omega t$ як поточну фазу, функція переміщення набуває вигляду:

$$\begin{cases} X = A * \sin \omega_1 t + \varphi_0 \\ Y = B * \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (2.4)$$

Між періодами взаємно перпендикулярних коливань існує фундаментальне співвідношення:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{m}{n} \quad (2.5)$$

де m, n – прості взаємно цілі числа. За час T , що визначається як:

$$T = nT_1 = mT_2 \quad (2.6)$$

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 та динамічну нестабільність параметрів траєкторія постійно змінюється, що вимагає використання математичного моделювання як еталона.

Для систематизації опису растрової траєкторії введено поняття растру та кадру. Растр визначається як повний цикл проходження точки за час T (згідно з рівнянням 2.6). Зсув фаз за період растру T прагне до значень $2\pi n m$. Різницю частот (розсогласування) виразимо через відносний параметр:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \frac{n}{m}\omega_1 \quad (2.8)$$

де $\Delta\omega$ характеризує швидкість зміни конфігурації траєкторії. Кутова частота зміни растрів визначається як:

$$\Omega_r = \frac{2\pi}{mn\Delta\Omega} \quad (2.9)$$

Закономірності растрового руху пояснюють природу формування кадрів, що змінюються. *Кадром* називається частина растру, яка відповідає аргументу різниці фаз синусоїдальних коливань:

$$\Delta\varphi = |m\psi_1 - n\psi_2| = 2\pi \quad (2.10)$$

де ψ_1, ψ_2 –поточні фази коливань. Частота зміни кадрів у загальному випадку дорівнює різниці частот складників $\omega_k = \omega_2 - \omega_1$. При співвідношенні частот $\omega_2 / \omega_1 < 0,5$ щільність кадрів визначається низькочастотною складовою, тоді як високочастотна створює фоновий мікрорельєф. Така кінематика характерна для віброхонінгування з осциляцією (рис. 2.3). У частковому випадку, коли $m = n = 1$, растр ідентичний кадру. Процес формування кадру растрової циклоїди наведено на рис. 2.4.

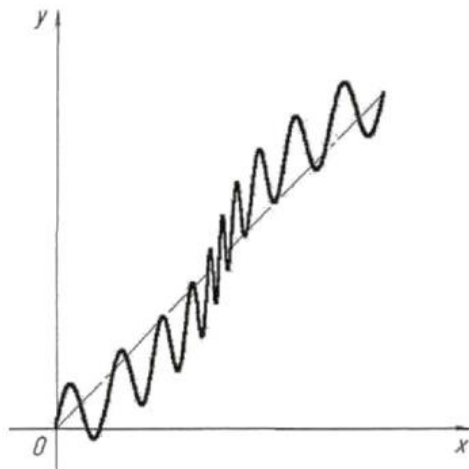


Рис. 2.3 – Траєкторія руху при $\omega_2 / \omega_1 < 0,5$

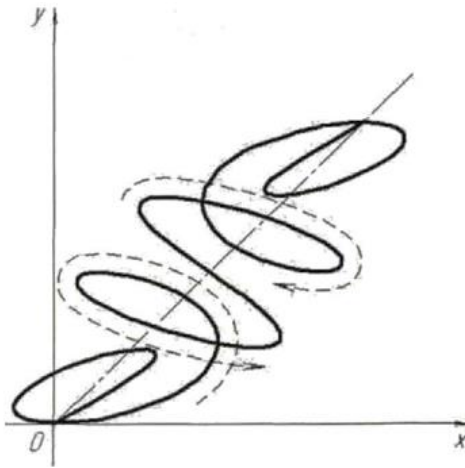


Рис. 2.4 – Траєкторія руху при $\omega_2 / \omega_1 = 4,5$

Як свідчить графічний аналіз, за час формування одного кадру растрової циклоїди точка двічі змінює напрямок кругового руху. Це явище зумовлене зміною знака похідної кута дотичної до траєкторії на протилежний протязом періоду кадру. Результати розрахунків динаміки кута нахилу траєкторії наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Значення похідної кута нахилу траєкторії за період кадру

Час, с	0	T/10	T/5	3T/10	2T/5	T/2	3T/5	7T/10	4T/5	9T/10	T
Y	5	0	2337	982	975	2818	0	-2818	-975	-982	-2337

Використання траєкторій із реверсивними змінами напрямку руху в межах одного кадру дозволяє вирішити проблему нерівномірного зношування різального інструменту та забезпечує стабільність мікрорельєфу поверхні.

У процесі хонінгування особливий інтерес становлять траєкторії, у яких початкові частоти мають близькі значення. Співвідношення частот у такому разі можна представити як:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n}{m} \pm \Delta \quad (2.11)$$

де Δ – мале відхилення частоти. При будь-якому наборі частот можна виділити випадок $m - n = 1$, що дозволяє детально дослідити головний рух у межах одного кадру.

На відміну від класичної кінематики, «растрова циклоїда» кадру функціонально залежить від параметрів простих рухів та їхньої варіативності. Геометрія растрової траєкторії визначається кроком гвинтової лінії та кутом її нахилу (рис. 2.5). Кут нахилу траєкторії α визначається залежністю:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{A * \omega_1}{B * \omega_2 * V_{kp}} \right) \quad (2.12)$$

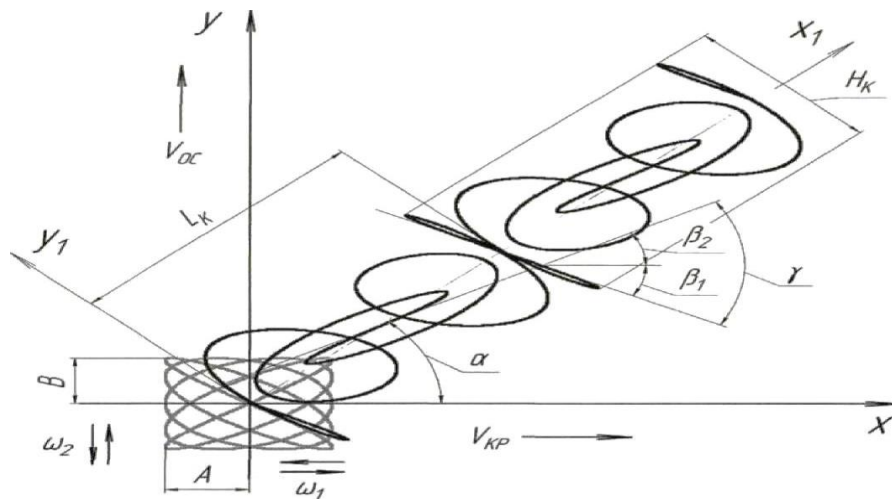


Рис. 2.5. Геометричні параметри растрової траєкторії та кути нахилу

Для аналізу величини кадру доцільно перейти до системи координат $X_1 O Y_1$, де вісь X_1 збігається з напрямком гвинтової лінії. У цій системі рівняння руху (2.1) трансформуються:

$$\begin{cases} X_1 = V_p * t \\ Y_1 = B_1 * \sin(\omega_k * t + \varphi_0) \end{cases} \quad (2.13)$$

де V_p – швидкість руху різальних часток уздовж гвинтової траєкторії. Аналіз рівняння (2.13) свідчить, що функція переміщення є періодичною з періодом $T = \frac{2\pi}{\omega_k}$, що описує осциляцію частинок відносно гвинтової лінії.

Визначимо лінійну величину «растрової циклоїди» за час формування кадру T_k у напрямку осей X_1, Y_1 (при $\varphi_0 = 0$). Довжину кадру L_k розрахуємо шляхом інтегрування швидкості переміщення в системі координат, пов'язаній із гвинтовою лінією:

$$L_k = \int_0^{T_k} \sqrt{\left(\frac{dX_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY_1}{dt}\right)^2} dt \quad (2.14)$$

Час T описує повторюваність циклів на гвинтовій лінії. Величина кадру L_k має вирішальне значення для рівномірності обробки. Залежність розміру кадру від середнього співвідношення частот $(\omega_1/\omega_2)_{cp}$ візуалізована на малюнку 2.6.

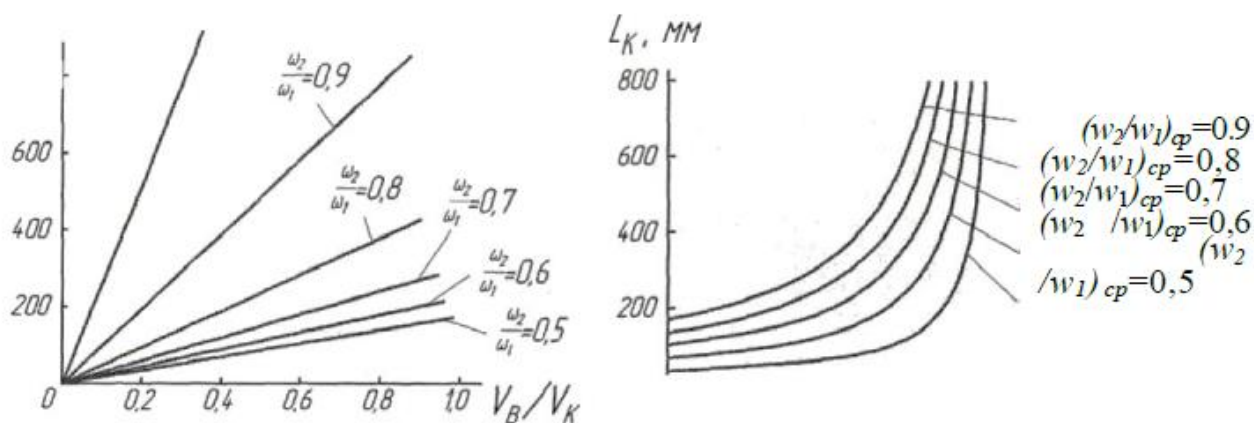


Рис. 2.6. Залежність розміру кадру від співвідношення частот у напрямку гвинтової лінії

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 $\varphi_0 = 0$, проєкції швидкості на осі координат мають вигляд:

$$\begin{cases} V_x = \frac{dX}{dt} = A\omega_1 \cos(\omega_1 t) + V_{кр} \\ V_y = \frac{dY}{dt} = B\omega_2 \cos(\omega_2 t) + V_{ос} \end{cases}$$

Модуль повної миттєвої швидкості визначається як геометрична сума її проекцій:

$$V(t) = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2.15)$$

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.

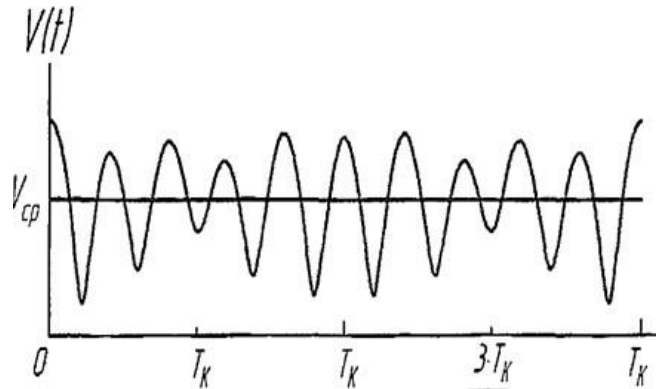


Рис. 2.7. Зміна вектора миттєвої швидкості за період кадру

Для практичних розрахунків інтенсивності знімання матеріалу використовують середню швидкість різання $V_{ср}$, яка для растрового руху з урахуванням амплітудних та лінійних складників може бути апроксимована залежністю:

$$V_{ср} \approx \sqrt{(0,67A\omega_1)^2 + (0,67B\omega_2)^2 + (V_{ос}^2 + V_{кр}^2)} \quad (2.17)$$

Графік залежності середньої швидкості $V_{ср}$ від відношення частот коливань при різних значеннях швидкостей подачі наведено на рис. 2.8.

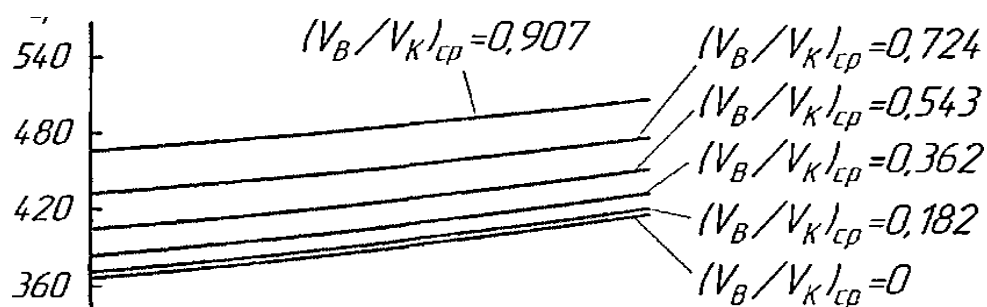


Рис. 2.8. Залежність середньої швидкості від частоти коливань (при подачах 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 мм/с)

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. **Різноспрямоване:** вектор швидкості та напрямок руху протягом одного циклу змінюються неодноразово (реверсивний рух).

Межа між односпрямованим та різноспрямованим рухами визначається критичним співвідношенням параметрів, яке можна виразити через коефіцієнт нерівномірності швидкості:

$$\frac{V_{max}}{V_{min}} \approx 1,6 \quad (2.18)$$

Численні дослідження [34, 35] підтверджують, що використання різноспрямованої кінематики суттєво інтенсифікує знімання металу та підвищує якість обробленої поверхні.

Динамічний стан системи характеризується повним прискоренням $W(t)$, яке визначається як друга похідна від параметричних рівнянь руху (2.1) за часом.

Повне прискорення є векторною сумою тангенціального та нормального прискорень:

$$W_n = \frac{v^2}{p} \quad (2.19)$$

де p – радіус кривизни траєкторії. Графік зміни миттєвого повного прискорення протягом періоду кадру представлено на рис. 2.9. Різкі коливання прискорення сприяють кращому самозагостренню абразивних зерен та інтенсифікації процесу мікрорізання.

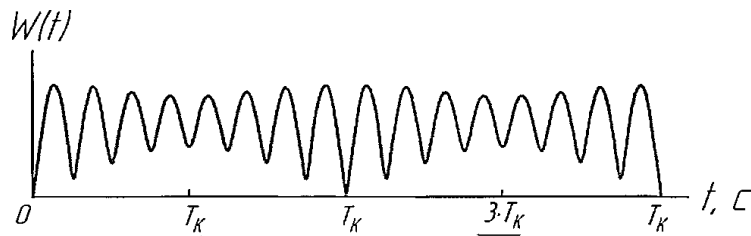


Рис. 2.9. Зміна миттєвого повного прискорення протягом періоду кадру

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.

3. Метрологічна точність: вимірювальний шпиндель (вісь С) 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 (А та В) 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. Вимірювально-діагностичний комплекс MFK 500 для контролю похибок геометричної форми.

Нижче наведено результати первинних вимірювань циліндрів блоку до проведення відновлювальних робіт, що демонструють характерні відхилення профілю поздовжнього перерізу (бочкоподібність).

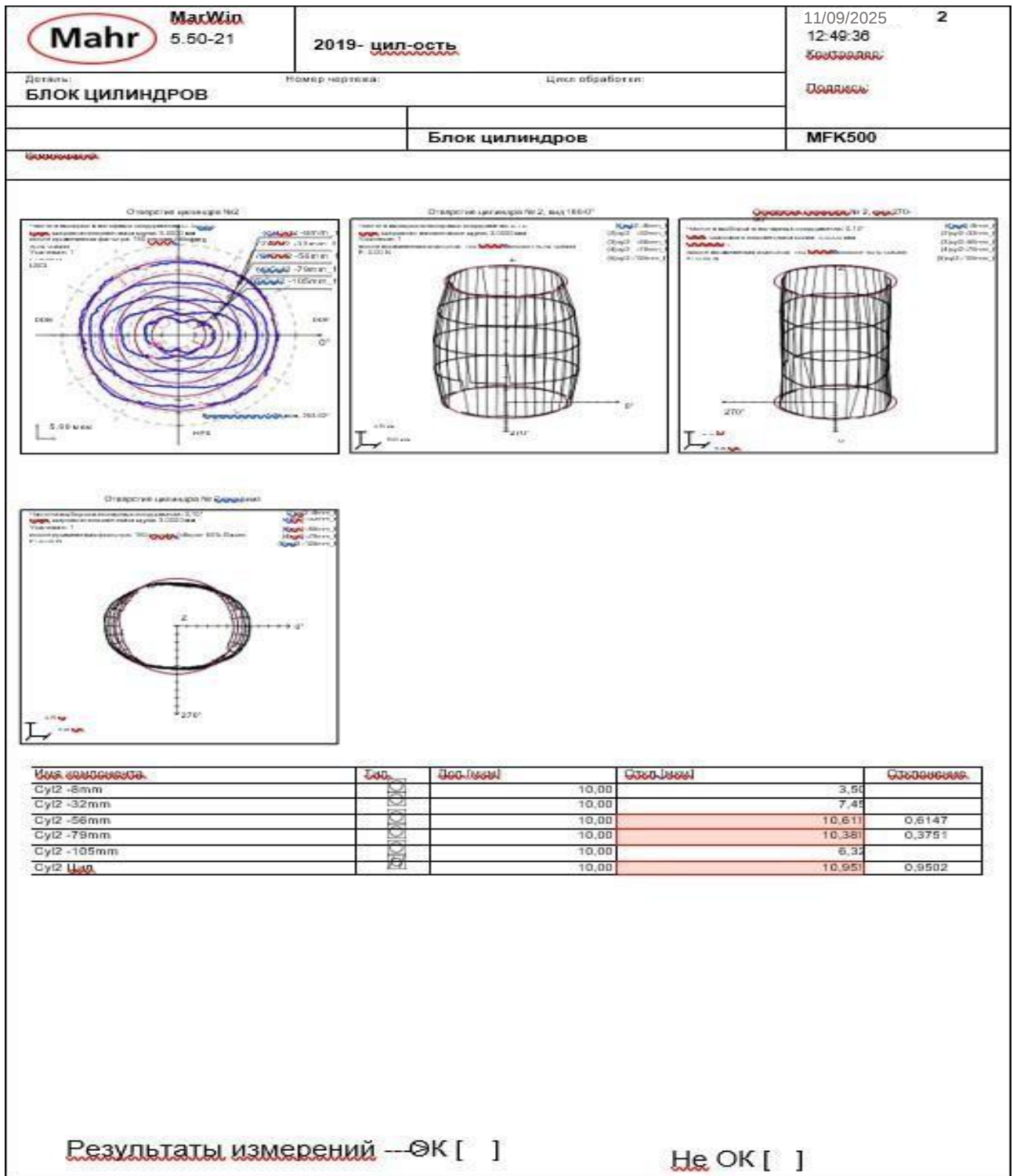
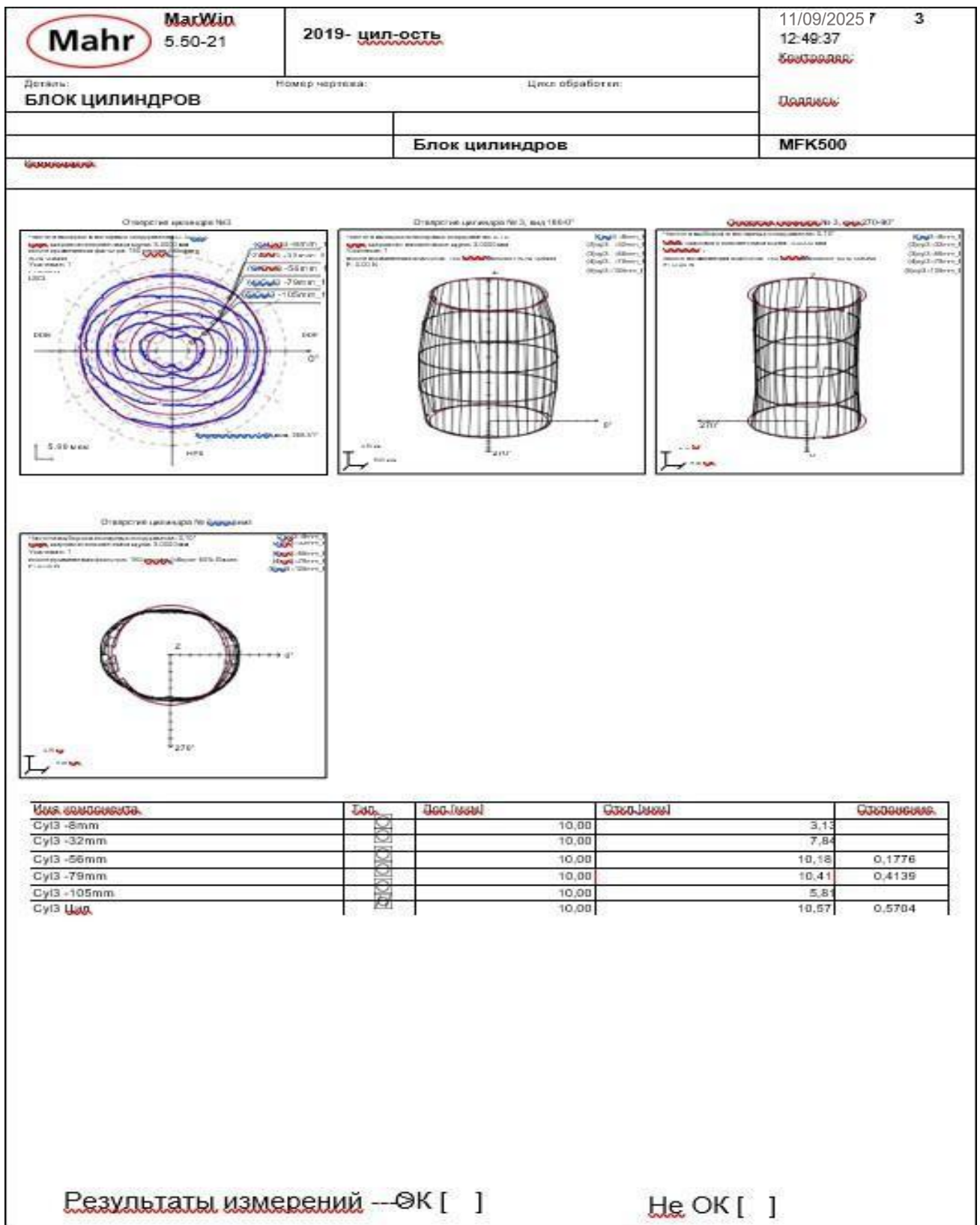
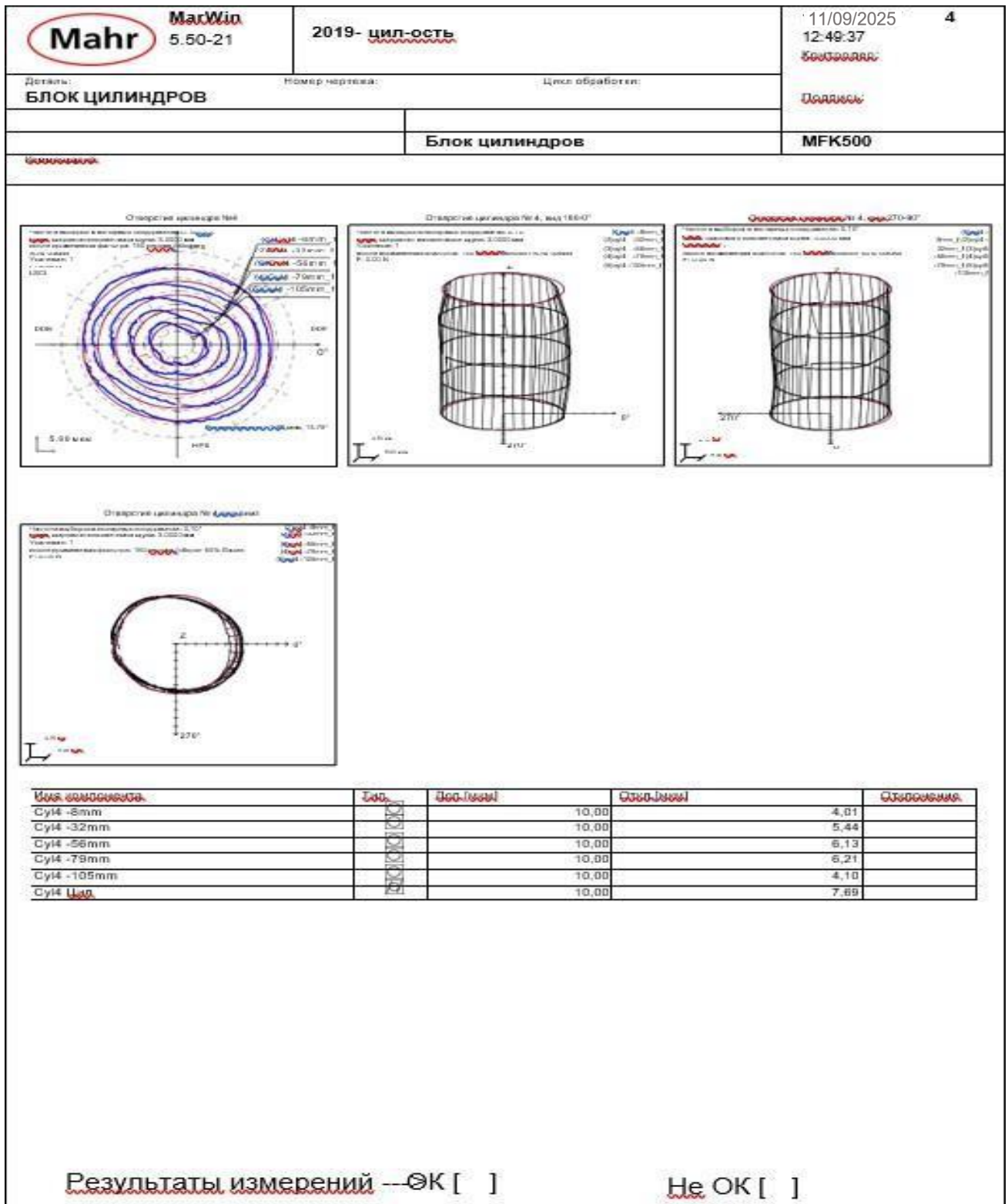


Рис. 3.2. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності (бочкоподібність) циліндра №1.



**Рис. 3.3. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності
(бочкоподібність) циліндра №2.**



**Рис. 3.4. Графічний звіт про відхилення від прямолінійності
(бочкоподібність) циліндра №3.**

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.

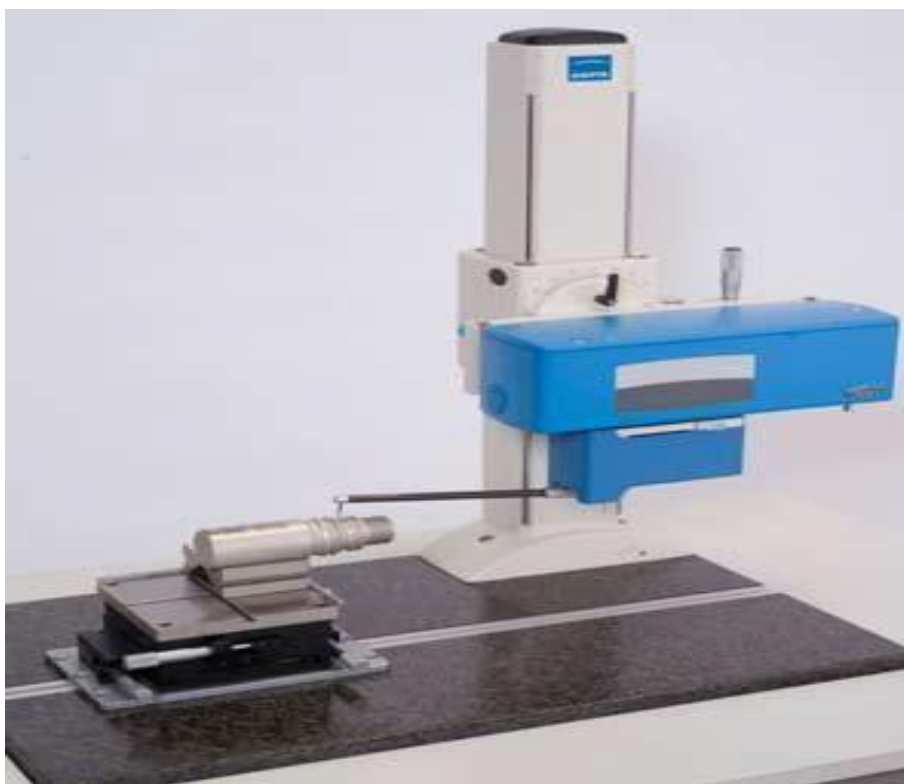
Дія комплексу базується на методі безпосереднього індентування (обмацування) мікронервностей досліджуваної поверхні алмазною голкою вимірювального перетворювача. Механічні коливання щупа, що виникають під час його переміщення, трансформуються в електричні сигнали, пропорційні амплітуді нерівностей. Отриманий 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 $\mp 45^\circ$, з можливістю прецизійного мікрометричного налаштування в межах $\mp 5^\circ$.

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**

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 хонінгування	Традиційне хонінгування
Швидкість різання $V_{різ}$, м/хв	28,4	28,5
Кількість брусків у головці, шт	2	2
Питомий тиск P , МПа	0,1 – 1,0	0,1 – 1,0
Обладнання	«Nagel»	«Nagel»
Склад ЗОР (СОЖ)	70% гасу, 30% мастила «Індустріальне»	70% гасу, 30% мастила «Індустріальне»

Вибір режимів обґрунтовано технічними можливостями кінематики верстата «Nagel». Обробка проводилася для зразків зі сталі 95X18 (HRC 54...58) діаметром 18 мм та довжиною 60 мм. Використовувалися алмазні бруски АС6 80/63-М5-07-100% та КР 80/63-М5-07-100%. Вихідна шорсткість поверхні перед кожним етапом підтримувалася на стабільному рівні. Результати експериментальних досліджень узагальнено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Результати порівняльних досліджень показників процесу

Метод обробки	Показник	0,2 МПа	0,3 МПа	0,4 МПа	0,5 МПа	0,7 МПа	0,9 МПа	0,95 МПа
Растрове хонінгування	Q (мкм/хв)	12,0	20,0	25,5	34,0	50,0	78,0	83,5
	Ra, мкм	0,40	–	0,37	–	0,40	–	0,64
	$A_{ac} / A_{мет}$	0,016	0,023	0,025	0,028	0,024	0,07	0,09
Традиційне хонінгування	Q (мкм/хв)	–	–	13,0	–	34,0	63,0	–
	Ra, мкм	–	–	0,53	–	0,52	0,76	–
	$A_{ac} / A_{мет}$	–	–	0,022	–	0,020	0,035	–

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.

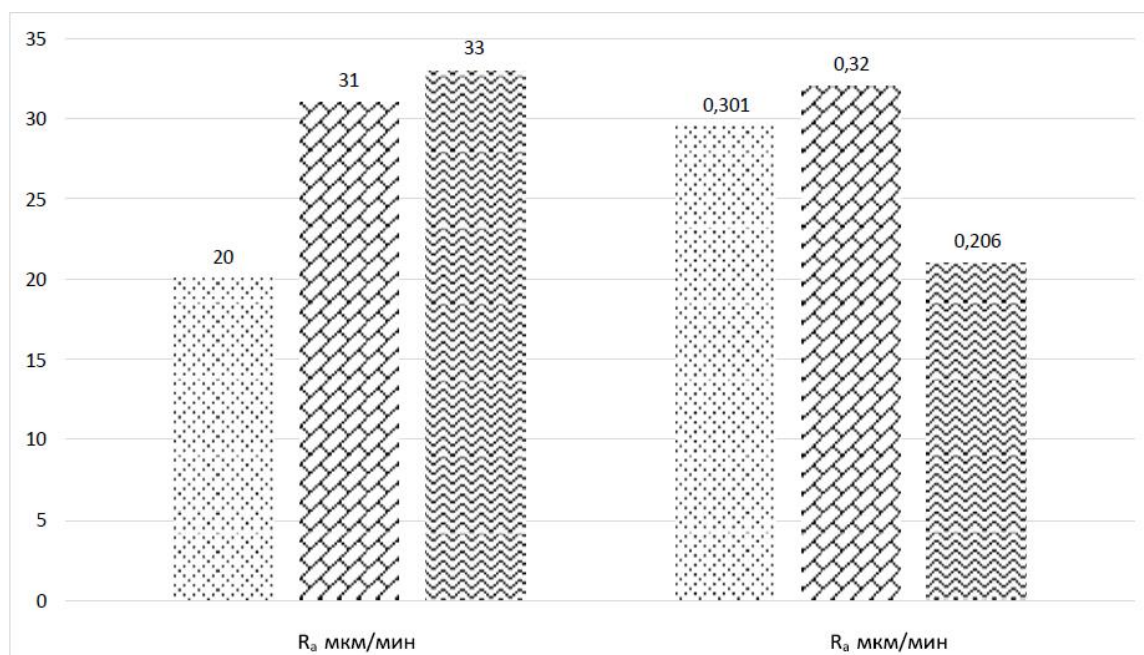
Растрове хонінгування демонструє стабільну роботу на менших тисках завдяки складній різноспрямованій траєкторії, що активізує ефект

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 КМ 80/63-М5-2-100%)

Показник процесу	Традиційне	З 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 $R_a = 0,206$ мкм).

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 $Ra = 0,2 \dots 0,8$ 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 КР) та синтетичних алмазів (марка АС20) наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4.

Порівняльні показники циклів хонінгування чавуну Gh 190B

Номер циклу	КР 80/63-M5-22-100%	АС20 80/63-M5-22-100%
	$A_{\text{мет}}, \text{мкм}$	$Q, \text{мкм/хв}$
1	18,0	36,0
2	17,0	34,0
3	18,0	36,0
5	16,5	33,0
7	17,5	35,0
10	17,0	34,0

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

електронною мікроскопією. Процес мікрорізання трансформується у процес вигладжування, що унеможливило виправлення геометричних похибок.

Таблиця 4.5.

Технологічні характеристики інструменту

Характеристика брусків	$A_{\text{мет}},$ мкм	$Q,$ мкм/хв	$A_{\text{стм}},$ мкм	$K,$ мг/г	$Ra,$ мкм
КР 80/63-М5-22-100%	17,0	34,0	2,0	0,8	0,301
АС20 80/63-М5-22-100%	3,7	7,4	0,9	2,28	0,230
КМ 60/40-МД-50%	15,0	30,0	2,3	2,6	0,187
АСН 60/40-МД-50%	3,5	7,0	4,0	14,2	0,220

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.

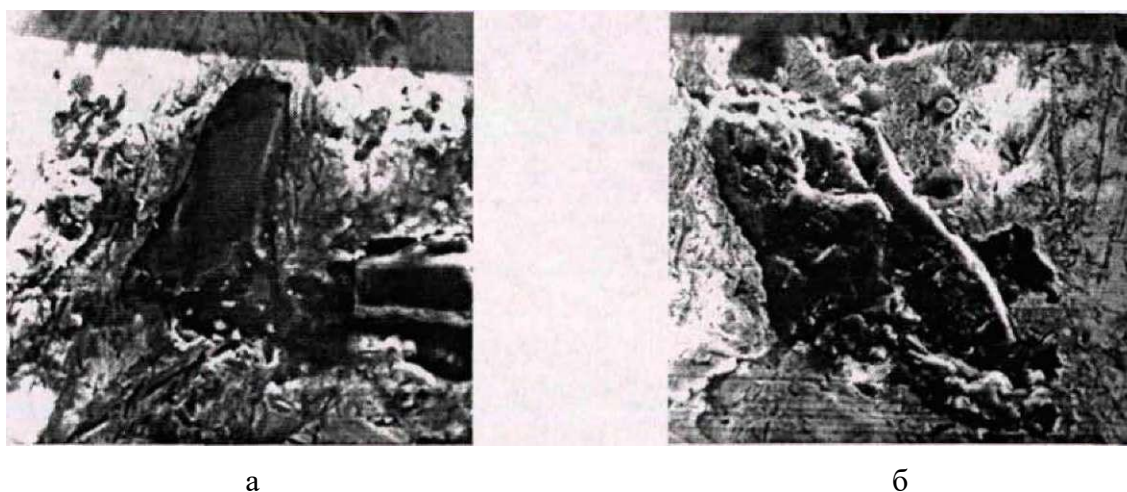


Рис. 4.2. Характер зношування різальних зерен (збільшення $\times 2500$):

а) АС20 125/100 (інтенсивне засалювання та затуплення);

б) КР 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.

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 («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: $T_{\text{хон}} = 0,5$ хв; $P = 0,8$ МПа; $V_{\text{різ}} = 21$ м/хв).

Таблиця 4.6.

Вплив характеристик брусків на базі КНБ на показники хонінгування

Характеристика брусків	$A_{\text{мет}},$ мкм	$Q,$ см ³ /см ² ·хв	$A_{\text{стм}},$ мкм	$K_{\text{т/т}}$	$Ra,$ мкм
КМ 40/28-М5-22-50%	14,0	0,35	2,2	1,0	0,135
КМ 60/40-МД-50%	15,0	0,38	4,3	2,6	0,187
КМ 60/40-М5-22-100%	15,0	0,38	2,2	1,0	0,180
КР 80/63-М5-22-100%	17,0	0,40	2,0	0,8	0,301
КР 125/100-М5-22-100%	20,0	0,46	1,8	0,75	0,590

Для фінішних операцій хонінгування блоків циліндрів із чавуну Gh 190В було досліджено ефективність застосування брусків на еластичних (каучуковмісних) зв'язках типів P11 – P18Т. 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	$Ra_{\text{ср}},$ мкм	$\Delta Ra,$ мкм	$Ra_{\text{вих}},$ мкм
АСМ 40/28-P18Т-50%	0,116	0,013	0,190...0,210
АСМ 40/28-P11Т-50%	0,105	0,014	0,190...0,210
АСМ 40/28-P14/P9-50%	0,115	0,014	0,190...0,210
АСМ 40/28-P11/P9-50%	0,119	0,013	0,190...0,210

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 Р11Т, результати яких наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8.

Вплив зернистості алмазного інструменту на кінцевий мікрорельєф

Параметри алмазного інструменту	$Ra_{\text{ср}}$, мкм	R_z (відхилення), мкм	$Ra_{\text{вих}}$, мкм
АСМ 40/28-Р11Т-50%	0,0310	0,0072	0,12...0,15
АС4 50/40-Р11Т-50%	0,0311	0,0040	0,12...0,15
АС4 80/63-Р11Т-50%	0,0516	0,0029	0,12...0,15

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-Р11Т-50%. Даний інструмент забезпечує ефективне видалення припуску без спотворення геометричної форми отвору та формує

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

$V_{\text{різ}}, \text{м/хв}$	$A_{\text{мет}}, \text{мкм}$	$Q, \text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{хв}$	$A_{\text{СТМ}}, \text{мкм}$	$K, \text{мг/г}$	$Ra_{\text{ср}}, \text{мкм}$
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 відносне 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%; $T_{\text{хон}} = 0,5 \text{ хв}$; $V_{\text{різ}} = 27 \text{ м/хв}$)

$P, \text{МПа}$	$A_{\text{мет}}, \text{мкм}$	$Q, \text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{хв}$	$A_{\text{СТМ}}, \text{мкм}$	$K, \text{мг/г}$	$Ra_{\text{ср}}, \text{мкм}$
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

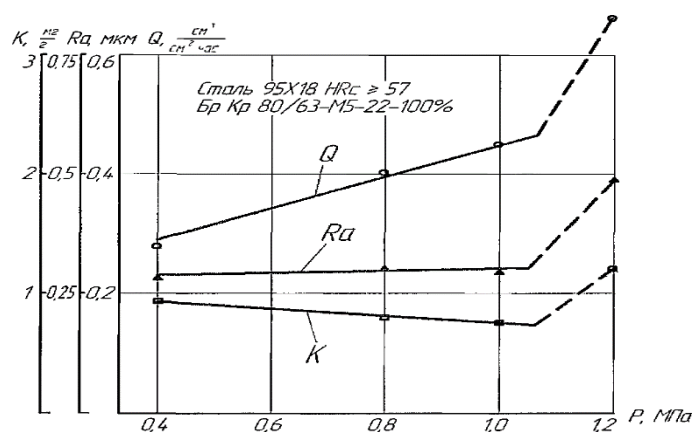


Рис. 4.3. Залежність продуктивності знімання матеріалу від питомого тиску притискання брусків.

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 мікрорізанню 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 мікрозадирок 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.

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 металоцилікатної 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 мікрозадирок – у табл. 4.11.

Таблиця 4.11.

Вплив величини зрізаного шару на висоту мікрозадирок (h)

(Режими: $V_{\text{різ}} = 21 \text{ м/хв}$, $P = 0,8 \text{ МПа}$)

Метод хонінгування та характеристика брусків	Діаметральний зріз, мкм	h в отв. Ø3 мм, мкм	h в отв. Ø5 мм, мкм
Традиційне (КР 80/63-М5-22)	22	11,0	10,0
	40	16,5	17,5
	62	23,0	24,0
Традиційне (АС15 80/63-М5-22)	22	11,0	15,0
	40	20,5	30,0
	59	32,5	35,0
Растрове (КР 80/63-М5-22)	30	5,0	6,0
	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 мікрозадирок. 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 задирок залишається мінімальною (4,5–6 мкм) незалежно від величини припуску завдяки постійній зміні напрямку руху різальних зерен.

Мікроскопічний аналіз структури задирок показав, що при традиційній обробці вони часто мають форму скрученої кульки (результат поперечного зминання). При растровому методі задирки мають значно слабший «корінь», що полегшує їх видалення. Дослідження міцності та розмірів задирок наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12.

Вплив абразиву та кінематики на параметри мікрозадирок

Метод та характеристика брусків	h (отв. Ø3 мм), мкм	Міцність, Н	h (отв. Ø15 мм), мкм	Міцність, Н
Традиційне (КР 80/63)	11,0	2,15	10,0	1,76
	23,0	5,88	24,0	3,82
Традиційне (АС 15)	11,0	6,66	15,0	8,23
	32,5	10,2	35,0	9,11
Растрове (КР 80/63)	5,0	0,44	6,0	0,64
	5,5	0,48	5,0	0,60

Аналіз підтверджує, що растровий метод з використанням КНБ забезпечує не лише мінімальну висоту задирок, 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 мікрозадирок 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 мікрозадирок. 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 мікрозадилок

Характеристика брусків	$A_{\text{мет}}, \text{ мкм}$	$h, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$
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 задилок 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	$P, \text{ МПа}$	$A_{\text{мет}}, \text{ мкм}$	$h, \text{ мкм}$	$Ra, \text{ мкм}$
12ХН3А	0,3	51,0	14,8	0,179
	0,6	48,0	13,5	0,220
	1,0	56,0	14,0	0,242
95Х18	0,3	51,0	14,9	0,233
	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 мікрозадилок (табл. 4.15) підтверджує перевагу растрової кінематики: навіть при максимальному тиску $P=1 \text{ МПа}$ висота задилок при растровому хонінгуванні є в 3,4 разу меншою, ніж при традиційному.

Таблиця 4.15.

Залежність висоти мікрозадірок (h) від величини тиску

Метод та характеристика брусків	h (мкм) при $P=0,2$ МПа	$P=0,6$ МПа	$P=0,8$ МПа	$P=1,0$ 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

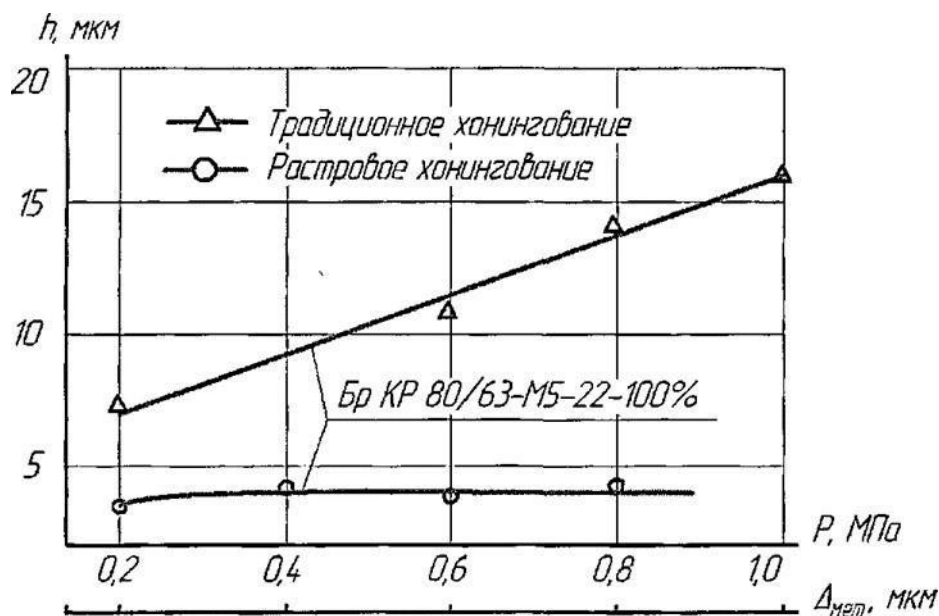


Рис. 4.4. Графічна залежність висоти мікрозадірок від питомого тиску брусків.

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 кромки, що нівелює цей ефект.

У випадках, коли довжина оброблюваної поверхні співвідноситься з довжиною інструменту, растрове хонінгування доцільно проводити без осової подачі ($V_{oc} = 0$). Режимі обробки при цьому встановлювалися на рівні: $V_{різ} = 22$

м/хв; тиск $P=0,6\ldots 1,0$ МПа для розмірного хонінгування та $P=0,6\ldots 0,8$ МПа для чистового. Схема такої траєкторії для контрольних кілець наведена на рис. 4.5.

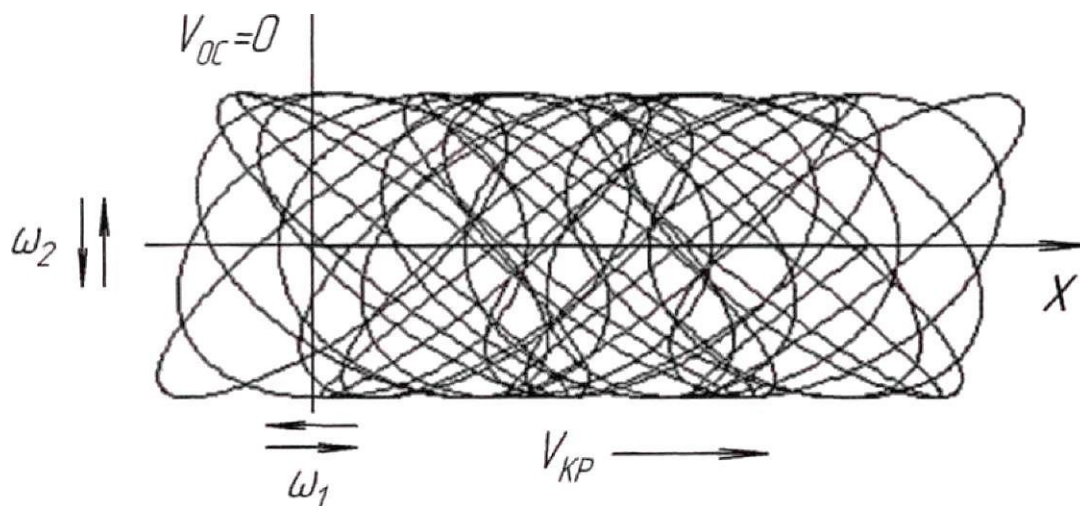


Рис. 4.5. Растрова траєкторія робочого руху без осьової подачі при хонінгуванні прецизійних кілець.

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 ($\varnothing 35$ мм) становила понад 30 мкм при шорсткості $Ra = 0,6\ldots 1,2$ мкм, досягнення технічних вимог ($Ra = 0,025$ мкм, похибка форми < 2 мкм) потребувало двостадійної обробки.

Дослідження проводилися за схемою «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.

Таблиця 4.16.

Порівняння продуктивності та шорсткості при розмірному хонінгуванні
(Режими: $P = 0,8$ МПа, $V_{різ} = 22$ м/хв)

Характеристика брусків	Продуктивність $Q_{ср}$, мкм/хв	Шорсткість $Ra_{ср}$, мкм
АС6 63/50 - М2-01 - 100%	36	0,32
КМ 60/40 - М2-01 - 100%	40	0,15
КМ 40/28 - М5-22 - 50%	44	0,12

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 бруска	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4	Цикл 5	Цикл 6	Цикл 7	Цикл 8
АС6 63/50-М2-01	88	61	32	47	25	12	12	11
КМ 60/40-М2-01	58	36	51	44	37	40	22	35
КМ 40/28-М5-22	55	45	45	37	52	31	40	46

Для досягнення фінальної шорсткості $Ra = 0,025$ мкм після розмірного етапу застосовувалося чистове (фінішне) хонінгування на еластичних (полімерних) зв'язках при тиску $P = 0,6 \dots 0$, 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) кромки отворів.

Вплив характеристик фінішних брусків на шорсткість

(Режими: $T_{\text{хон}} = 30 \text{ с}$; $P = 0,8 \text{ МПа}$, $V_{\text{різ}} = 22 \text{ м/хв}$)

Характеристика брусків	Шорсткість $R_{\text{аср}}$, мкм
АСМ 40/28 - P9/P4 - 25%	0,040
АСМ 28/20 - P11 - 50%	0,027
АСМ 20/14 - P9 - 25%	0,022

Найкращі результати забезпечує інструмент зернистістю 20/14 на зв'язці P9, що дозволяє стабільно отримувати шорсткість на рівні $R_a = 0,022 \dots 0,025 \text{ мкм}$. Бруски на більш зносостійкій зв'язці P11T вимагають більшого часу обробки для досягнення аналогічних показників.

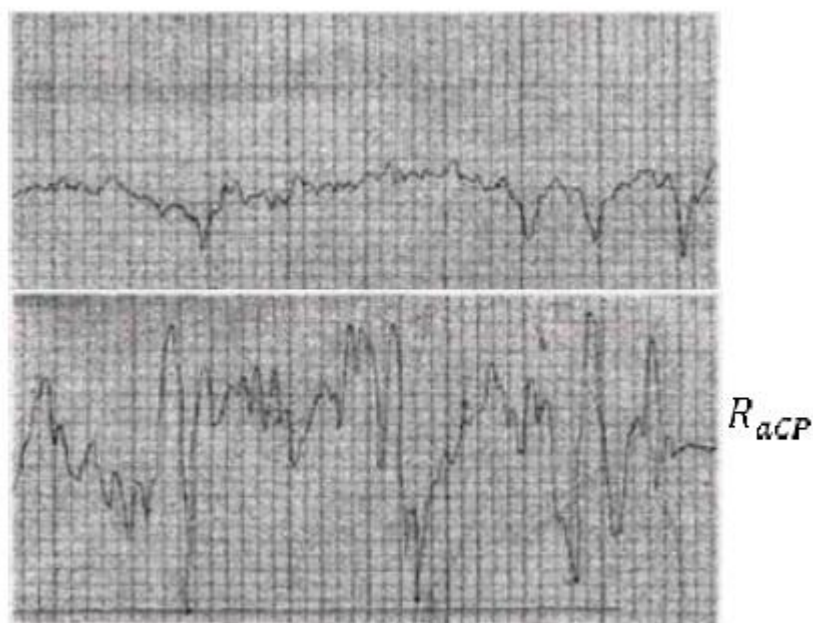
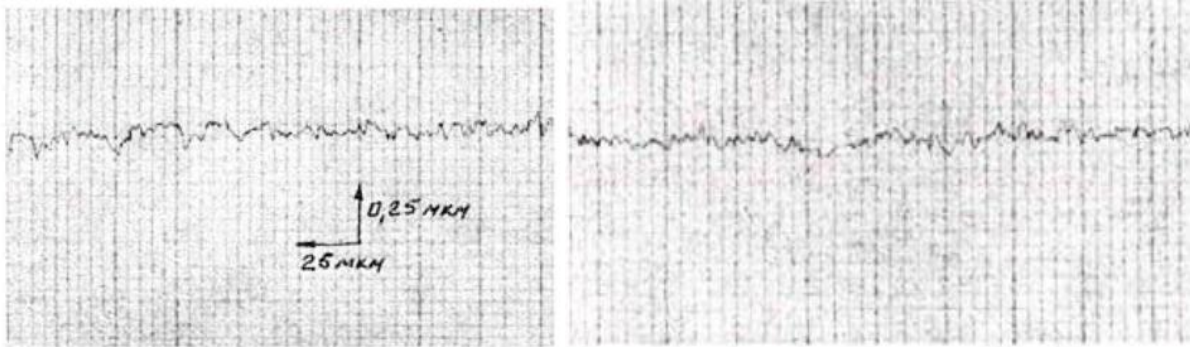


Рис. 4.6. Порівняння мікропрофілю після розмірного (КМ 40/28) та чистового хонінгування (АСМ 40/28-P9/P4)



$R_{acp} = 0.33$ мкм чистове хонінгування
АСМ 28/20- P11- 50%

$R_{acp} = 0.022$ мкм, Чистове хонінгування
АСМ 20/14- P9- 25% $T_{хон} = 30$ сек

Рис. 4.7. Фінішний стан поверхні ($R_a = 0,022$ мкм) після чистового хонінгування брусками АСМ 20/14-Р9-25%

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ РАСТРОВОМУ ХОНІНГНУВАННІ

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 «верстат–пристосування–інструмент–деталь» (В ПД).
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 ($V_{кр}$) та зворотно-поступальною ($V_{ос}$) 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 ($L_{отв}$), довжини брусків ($L_{бр}$), величини ходу (L_x) та перебігу ($L_{п}$).

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 однаковий час:

$$t = \frac{L_{\text{бр}}}{V_{\text{oc}}} \quad (5.1)$$

за умови константи швидкості V_{oc} . Такий спосіб забезпечує теоретично ідеальну прямолінійність твірної, проте на практиці при хонінгуванні застосовується рідко через небезпеку пошкодження країв отвору та нестабільність положення хонінгувальної головки.

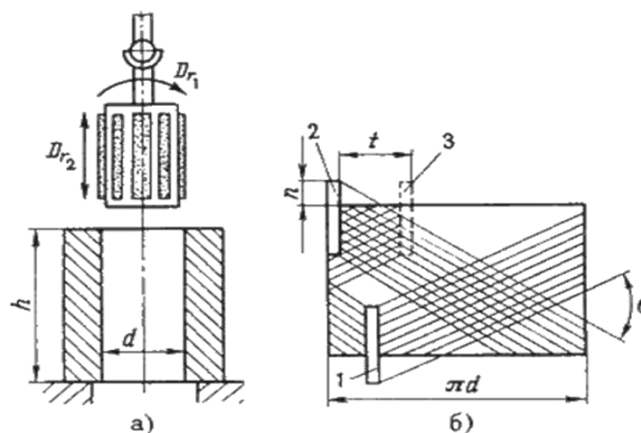


Рис. 5.1. Схема абразивної обробки при повному виході інструменту за межі отвору.

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.

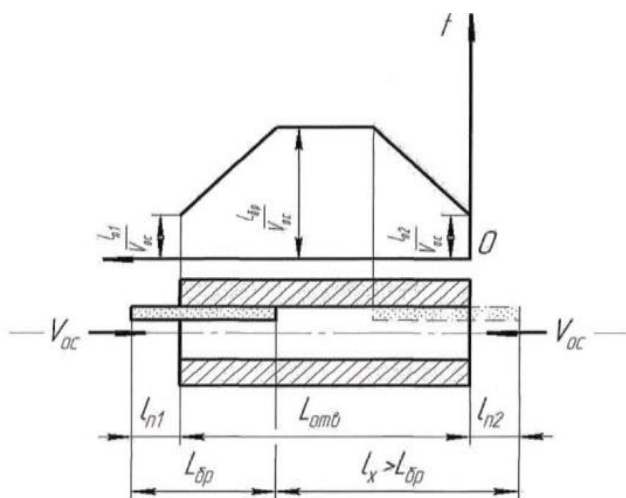


Рис. 5.2. Схема контактування брусків при неповному виході з отвору та графік розподілу часу контакту

Для розрахунку часових інтервалів при растровому хонінгуванні використано методику, адаптовану з теорії прецизійної доводки поверхонь. Досліджено два режими обробки при встановленій швидкості $V_{\text{ос}}$:

а) $L_x > L_{\text{бр}}$ – забезпечує інтенсивніше виправлення похибок у центральній частині;

б) $L_x < L_{\text{бр}}$ – режим, характерний для обробки коротких отворів.

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 ($L_{\text{п}}$) ефективно компенсувати такі дефекти, як бочкоподібність, конусність або седлоподібність циліндрів.

Розглянемо випадок, коли довжина ходу інструменту L_x перевищує довжину брусків $L_{\text{бр}}$ (рис. 5.2) за умови рівності величин перебігу на обох торцях ($L_{\text{п1}} = L_{\text{п2}}$) та постійної швидкості осьової подачі ($V_{\text{ос}}$). Графік тривалості контакту 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 t_1 спостерігається у середній частині циліндра:

$$t_1 = \frac{L_{\text{бп}}}{V_{\text{ос}}} \quad (5.2)$$

Тривалість контакту t_2 на краях циліндра є функцією величини перебігу інструменту:

$$t_2 = \frac{L_{\text{п}}}{V_{\text{ос}}} \quad (5.3)$$

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 $K_{\text{пб}}$, який є асиметричним відносно величини перебігу [33]. Різниця у часі роботи інструменту між центральною частиною та краями з урахуванням динаміки тиску дозволяє розрахувати необхідний час затримки (t_3) зворотно-поступального руху в точках реверсу:

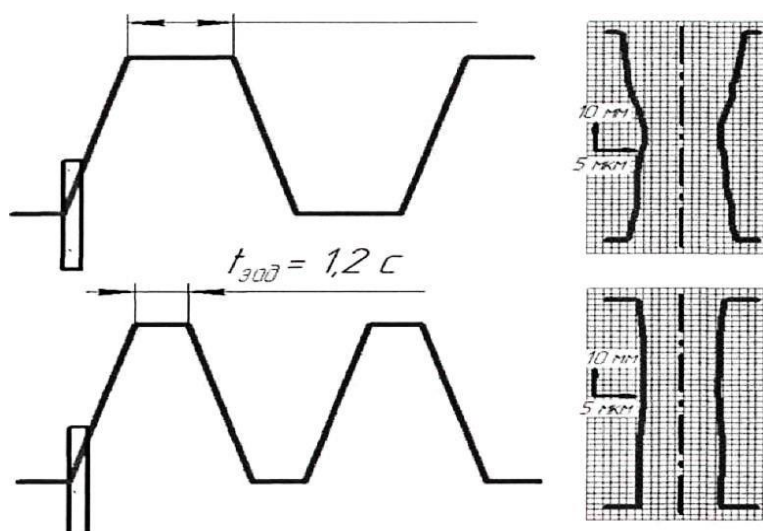
$$t_3 = \frac{L_{\text{бп}} - L_{\text{п}}}{V_{\text{ос}} * K_{\text{пб}}} \quad (5.4)$$

Випадок, коли $L_x < L_{\text{бп}}$, характерний для обробки «глухих» отворів або за обмеженого виходу інструменту. У цій ситуації максимальний час контакту визначається як $L_x / V_{\text{ос}}$, а розрахунковий час затримки в точках реверсування обчислюється аналогічно з урахуванням обмеженого ходу.

Теоретичні залежності були перевірені експериментально на установці «Растр-Ц20» при обробці деталей із чавуну Gh 190B та сталі 12ХН3А. Умови досліду: жорстке закріплення деталі, плаваюча хонінгувальна головка з 8 брусками (довжина брусків – 150 мм, характеристика КМ 40/28-М5-22-50%, $L_x = 38$ мм, $L_{\text{п}} = 10$ мм). Параметри головного руху: $\omega_1 = 133 \text{ с}^{-1}$, $A = 3,14$ мм; $\omega_2 = 114 \text{ с}^{-1}$, $B = 2,6$ мм.

Результати досліджень (рис. 5.3) підтверджують високу збіжність із теоретичними моделями:

- При затримці в точках реверсу $t_z \leq 0,2$ с формується **бочкоподібність** (відхилення 4–5 мкм).
- При збільшенні затримки до 2,5...3,0 с виникає **сідлоподібність** (відхилення 4–5 мкм).
- 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**.



**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 ($V_{кр} = 23,6$ мм/с) спостерігається осциляція похибки циліндричності.

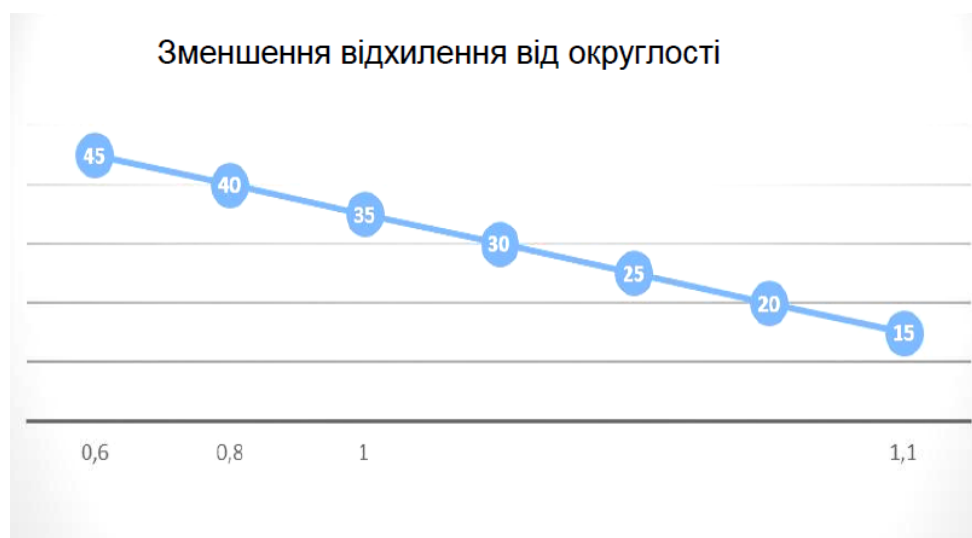


Рис. 5.4. Вплив кругової подачі на відхилення від круглості

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.

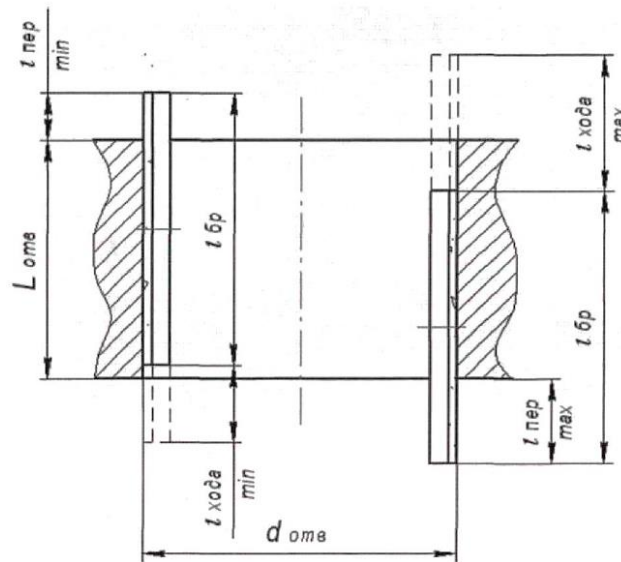
При хонінгуванні прецизійних отворів, довжина яких близька до довжини інструменту, діапазон налаштування осьового ходу (L_x) та величини перебігу (L_n) є суворо обмеженим. Експериментальні дані щодо впливу співвідношення геометричних параметрів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Вплив співвідношення довжин брусків та отвору на точність форми

Співвідношення $L_{бр}/L_{отв}$	$D_{отв},$ мм	$T_{хон},$ хв	$A_{мет},$ мкм	$\Delta_{почат},$ мкм	$\Delta_{одерж},$ 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 ($L_{бр}/L_{отв} = 0,83$) 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 ($L_{п}$) зазвичай встановлюють на рівні 1/3 довжини бруска ($L_{бр}$). Перевищення цього значення призводить до «розвалу» (збільшення діаметра) отвору біля його країв. Навпаки, недостатній осьовий хід спричиняє локалізацію контакту: бруски

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).

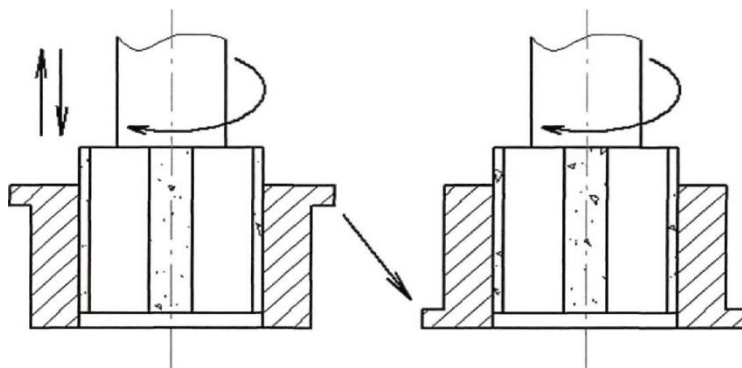


Рис. 5.6. Схема хонінгування за методом взаємної правки при перевертоті деталі

Технологічний цикл хонінгування в такому разі поділяється на підперіоди ($T_{\text{хон}} = T_1 + T_2 + \dots T_n$), протягом яких обробка здійснюється з перевертотом деталі на 180° . Це забезпечує:

- рівномірність контакту робочої поверхні брусків по всій твірній отвору;
- нівелювання вихідних погрешностей макрогеометрії;
- підвищення точності самої робочої поверхні брусків («взаємна правка»), 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 $D=18$ мм. Експеримент проводився шляхом одночасного хонінгування пакета з двох кілець при жорсткому закріпленні хонінгувальної головки. Варто зауважити, що при

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 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 (T_1) видаляється основний припуск. Після розвороту деталі на 180° (другий підперіод T_1) час обробки розраховується виходячи з величини залишкової похибки $\Delta_{\text{пр}}$ та швидкості знімання металу Q (мкм/хв). Розрахунковий час для другого етапу можна визначити за залежністю:

$$T_2 = \frac{2\Delta_{\text{пр}}}{Q} (\text{хв}) \quad (5.5)$$



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.

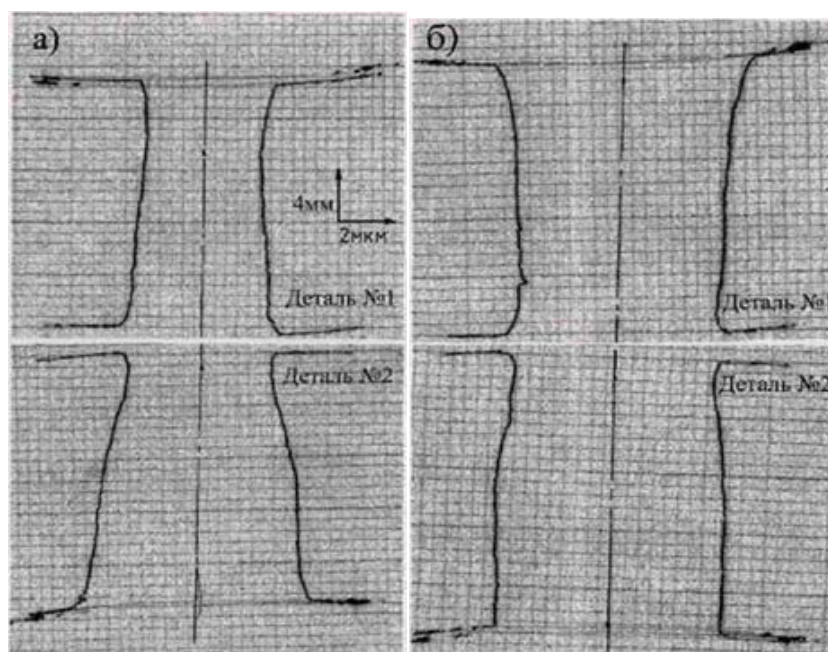


Рис. 5.8. Порівняння точності при обробці «пакетом» деталей: а) без перевероту ($\Delta_{\text{пр}} = 1,8 \text{ мкм}$); б) з методом взаємної правки ($\Delta_{\text{пр}} = 0,8 \text{ мкм}$).

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 $0,8 \dots 1,0 \text{ мкм}$.

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

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 $30^\circ \dots 60^\circ$ 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 коливань $B/A \approx 1$.

Результати дослідження впливу щільності сітки (q) на параметри шорсткості (R_a) та середньоквадратичне відхилення (σR_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	$q=0,06$	$q=0,1$	$q=0,3$	$q=0,7$	$q=1,0$	$q=3,0$
R_a, мкм	0,2400	0,2200	0,2000	0,1710	0,1600	0,1500
σR_a, мкм	0,0245	0,0225	0,0180	0,0160	0,0150	0,0135

Таблиця 5.3.

Вплив щільності сітки (q) на параметри шорсткості (бруски КМ 40/28-М5-22-50%)

Параметр	$q=0,06$	$q=0,1$	$q=0,3$	$q=0,7$	$q=1,0$	$q=3,0$
R_a , мкм	0,150	0,146	0,130	0,124	0,110	0,105
σR_a , мкм	0,009	0,007	0,006	0,006	0,005	0,005

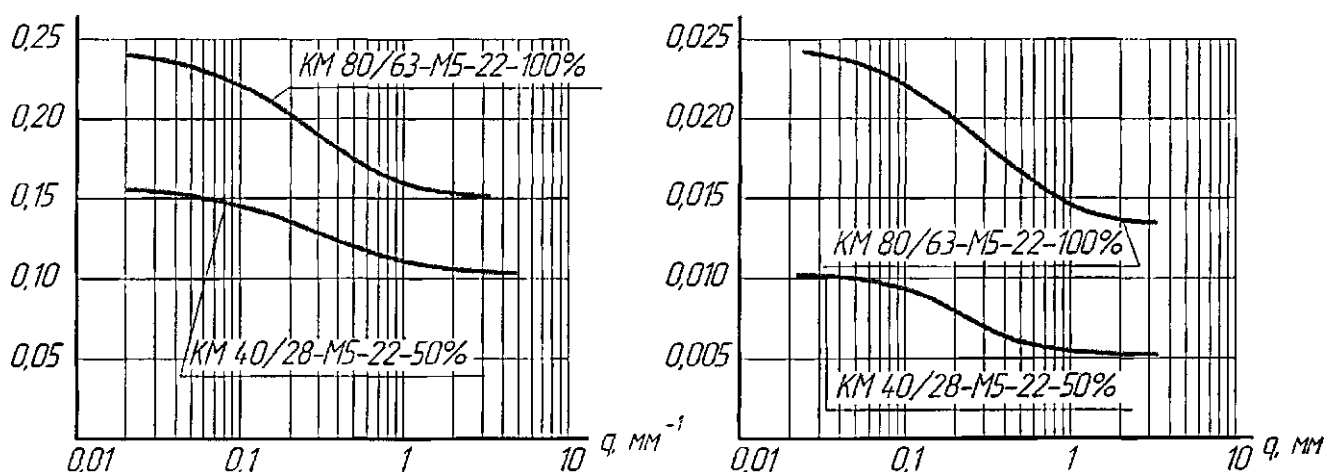


Рисунок 5.9. Залежність параметрів шорсткості від щільності сітки при растровому хонінгуванні.

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 (σR_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.

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 "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 металоцилікатних 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

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 (t_3) стало ключем до вирішення проблеми бочкоподібності та конусності отворів. Розраховане значення затримки у 1,2 секунди, підтверджене практичними замірами на установці «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 Р9 показала унікальні результати: параметр шорсткості R_a 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 "поршневе кільце – гільза". Дослідження структури мікрозадирок під електронним мікроскопом підтвердило, що растрова траєкторія практично повністю усуває проблему "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 «Nagel». Метод взаємної правки (хонінгування з переверотом 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

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.

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 «ХП», 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 «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.

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 "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.