

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА
ЕНЕРГЕТИКИ



КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Оцінка впливу характеристик хонінгувальних брусків на
якість поверхні і ресурс гільз циліндрів в КАТП
«Агробудавтосервіс»»

Виконав:

магістрант групи АТ-23М-1 Ярослав ГАЛОЧКІН
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

канд. техн. наук, доцент Сергій МАРКОВИЧ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

канд. техн. наук, доцент Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Рецензент:

_____?
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Кропивницький – 2024 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Автомобільний транспорт»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Галочкіну Ярославу Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Оцінка впливу характеристик хонінгувальних брусків на якість поверхні і ресурс гільз циліндрів в КАТП «Агробудавтосервіс»»

керівник роботи: Маркович Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» ____ 2024 року
№ _____

2. Строк подання здобувачем роботи «__» _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: дані переддипломної практики; технологічні карти дефектування та ремонту колінчастих валів в КАТП «Агробудавтосервіс»; Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. – К.: Знання-Прес, 2003. – 511 с.; Ремонт автомобілів: Навчальний посібник/ Упор. В.Я. Чабанний. - Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. - 348 с. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згорання. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти вищих навчальних закладів. / Укл. Маркович С.І., Бевз О.В. - Кропивницький: ЦНТУ, 2022. - 315 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ, реферат

- 4.1 Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень
- 4.2 Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень
- 4.3 Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта
- 4.4 Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень
5. Перелік ілюстративного матеріалу:
1. Назва роботи, ціль роботи, предмет та об'єкт досліджень, задачі, наукова новизна, практичне значення дослідження та публікації.
2. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування напрямку наукових досліджень.
3. Ілюстративні матеріали що до аналізу об'єкта досліджень.
4. Ілюстративні матеріали що до дослідження впливу зміни параметрів об'єкта
5. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування ефективності прийняття рішень
6. Висновки

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>Вступ, реферат</u>	30.10.2024 р.	
2	<u>Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень</u>	02.11.2024 р.	
3	<u>Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень</u>	05.11.2024 р.	
4	<u>Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта</u>	13.11.2024 р.	
5	<u>Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень</u>	28.11.2024 р.	
6	Формування ілюстративних матеріалів	01.12.2024 р.	

Магістрант _____
(підпис)

ГАЛОЧКІН Я.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Сергій МАРКОВИЧ
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою даної магістерської роботи є підвищення зносостійкості гільз циліндрів за рахунок розробки оптимальних критеріїв вибору параметрів хонінгувальних брусків

Об'єкт дослідження: процес обробки гільз циліндрів методом алмазного хонінгування

Предмет дослідження: залежності параметрів шорсткості внутрішньої поверхні гільз циліндрів від характеристик алмазних хонінгувальних брусків

В першому розділі проаналізовано процеси, що проходять при платовершинному алмазному хонінгуванні, їх взаємозв'язок з висотними параметрами гільз циліндрів та визначено задачі наукових досліджень.

В другому розділі вибрано типи дослідних зразків, устаткування, прилади та методики для проведення досліджень.

В третьому розділі дослідження проведено дослідження продуктивності та висотних параметрів процесу хонінгування брусками з металевою та вулканітною зв'язкою, при цьому визначено характер мікропрофілю оброблених поверхонь

Проведені порівняльні дослідження результатів хонінгування алмазними брусками на металевій та вулканітовій зв'язці. Визначені критерії якості та дефекти регулярного мікрорельєфу при хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці, а також проведено практичні експерименти для аналізу причин незадовільного стану мікрорельєфу оброблюваних поверхонь та розробка способів їх усунення. Дослідженню досягнення зниження часу прироблення відновленого спряження та підвищення його зносостійкості

В четвертому розділі приведено результати та відображено ефективність проведених досліджень на основі аналізу технологічного процесу відновлення гільз циліндрів з застосуванням хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 70 сторінок тексту, 29 рисунків, 12 таблиць.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	9
ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1. Загальні відомості про процес алмазного хонінгування	9
1.2. Вершинне алмазне хонінгування	12
1.3. Особливості процесу вершинного алмазного хонінгування напівеластичними брусками	14
1.4. Аналіз впливу характеристики напівеластичних алмазних брусків і параметрів процесу на шорсткість поверхонь, що хонінгуються	16
1.5. Нанесення регулярного мікрорельєфу за допомогою хонінгування	21
1.6. Висновки та задачі дослідження	22
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1. Вибір зразків для проведення дослідження	23
2.2. Вибір інструментів та пристосувань для дослідження процесу хонінгування	24
2.3. Прилади для контролю параметрів шорсткості поверхні	27
2.4. Методика та пристосування для проведення трибологічних досліджень	30
2.4.1. Дослідження зносостійкості	30
2.4.2. Методика та стенд для проведення порівняльних випробувань гільз та процесу їх припрацювання	33
РОЗДІЛ 3	

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА	34
3.1. Дослідження продуктивності та висотних параметрів процесу хонінгування брусками з металевою та вулканітною зв'язкою	34
3.2. Дослідження мікропрофілю оброблених поверхонь	39
3.3. Порівняльні дослідження результатів хонінгування алмазними брусками на металевій та вулканітовій зв'язці	43
3.4. Дослідження критеріїв якості та дефекти регулярного мікрорельєфу при хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці	51
3.5. Аналіз причин незадовільного стану мікрорельєфу оброблюваних поверхонь та розробка способів їх усунення	57
3.6. Дослідження досягнення зниження часу прироблення відновленого спряження та підвищення його зносостійкості	58
РОЗДІЛ 4	
ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	61
4.1. Обґрунтування ефективності прийняття рішень на основі аналізу технологічного процесу відновлення гільз циліндрів з застосуванням хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці	61
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

R_a - середнє арифметичне відхилення профілю, мкм

R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках, мкм

R_{max} – найбільша висота профілю, мкм

S - середній крок місцевих виступів профілю, мкм

S_m – середній крок нерівностей, мкм

t_r - відносна опорна довжина профілю, %

E – модуль пружності

P_i - робочий тиск брусків, МПа

r - радіус отвору, що обробляється, мм

r_b - радіус бруска, мм

b - ширина бруска, мм

z - число зерен на одиниці площі поверхні бруска, мм²

Z – число зерен

E - модуль пружності матеріалу, що обробляється

b_n - величина поглиблення зерна в зв'язку еластичного бруска

d - діаметр зерна, мм

n - частота обертання хонінгувальної головки, об/хв

U - швидкість обертання хонінгувальною головки, м/хв

V - швидкість зворотно-поступального руху хонінгувальної головки

N_6 - кількість брусків

ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння

ККД - коефіцієнт корисної дії

ЦПГ – циліндро-поршнева група

ВСТУП

Сучасне машинобудування висуває нові завдання забезпечення працездатності механізмів, машин та приладів, що працюють при більш високих рівнях робочих параметрів, у широкому інтервалі температур, навантажень, швидкостей, у різних газових, рідких, агресивних середовищах тощо. Їх рішення найтіснішим чином пов'язані з удосконаленням технологічних методів та засобів фінішної обробки деталей, тобто з технологічним забезпеченням високої точності їхньої геометричної форми, шорсткості поверхні та кращого фізичного стану поверхневих шарів. Це стосується, зокрема, численних деталей, що працюють у поєднанні «циліндр-поршень».

За статистикою, більшість машин (85...90 %) виходять з ладу в результаті зносу поверхонь окремих деталей. А витрати на ремонт та технічне обслуговування машини часто у кілька разів перевищують її вартість. Створення машин, що не вимагають капітальних ремонтів, зі збільшеним часом напрацювання на відмову дозволяє заощадити величезну кількість фінансових засобів, трудових ресурсів, матеріалів.

Визначальну роль забезпеченні експлуатаційних характеристик грає стан поверхневого шару, який остаточно формується при фінішних операціях. При фінішній обробці відповідальних деталей велику увагу приділяють дотриманню високих вимог до якості поверхні, її геометричної та розмірної точності. Мікрогеометрія поверхонь деталей машин та механізмів є одним з найважливіших експлуатаційних параметрів, що визначають надійність і довговічність виробів. При цьому слід зазначити, що важливого значення форма мікрорельєфу поверхонь набуває для сполучень, що працюють в умовах тертя. У таких сполученнях дуже важливо забезпечити мікропрофіль з оптимальними радіусами заокруглення виступів, з

оптимальною опорною площею, що несе, і достатньою маслоємністю. Згідно з літературними даними оптимальна висота мікронерівностей знаходиться в межах $Rz = 1,6...6,3$ мкм, відносна опорна довжина профілю не більше 50...80 %, площа, займана масляними кишеннями, становить 20...50 % від площі поверхні тертя [2]. Одним із ефективних методів отримання такої поверхні є алмазне хонінгування.

Прикладами пар «циліндр-поршень», що працюють в умовах інтенсивного зношування, є двигуни внутрішнього згорання. При цьому при ремонті таких пар найбільшу складність становить ремонт циліндра.

Технологічний маршрут обробки циліндра включає розточування, попереднє хонінгування і чистове хонінгування. Значною мірою зносостійкість поверхневого шару визначається величиною шорсткості та формою мікрорельєфу поверхні. Попереднє хонінгування проводиться алмазними брусками на металевій зв'язці зернистістю 100/80, чистове — металевими брусками меншої зернистості 63/50. Разом з тим чистове хонінгування доцільніше проводити брусками на еластичній зв'язці, що дозволяє отримувати поверхність, що забезпечує підвищення зносостійкості.

З цією ж метою можна використовувати напівеластичні алмазні бруски, які передбачають, що не вимагають попереднього хонінгування. Згідно з літературними даними оптимальна висота мікронерівностей знаходиться в межах $Rz = 1,6-6,3$ мкм, відносна опорна довжина профілю не більше 50...80 % лише на рівні 10...30 %.

Враховуючи високі технологічні вимоги до спряження гільза — поршень, як елементів ЦПГ двигуна внутрішнього згорання, а також значну трудомісткість процесу відновлення гільз циліндрів, ідея зміни технологічного маршруту за рахунок виключення операції попереднього хонінгування, а застосування хонінгування циліндрів напівеластичними брусками відразу після розточування. Розробці наукового та експериментального обґрунтування цієї ідеї, з забезпеченням підвищення

ресурсу та експлуатаційних параметрів ДВЗ, присвячена ця робота.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальні відомості про процес алмазного хонінгування

Хонінгування належить до найбільш ефективних методів обробки отворів з високою точністю та низькою шорсткістю. Хонінгування проводиться при одночасно виконуваних обертальному та зворотно-поступальному рухах інструменту (головки з абразивними або алмазними брусками) [8]. Подача (розжим) брусків у радіальному напрямку при хонінгуванні проводиться або безперервно, під впливом постійного зусилля або періодично (дозована подача). Кількість і розміри брусків визначаються розмірами отвору, що обробляється, і конструкцією хонінгувальної головки.

При контакті робочої поверхні бруска з оброблюваною поверхнею заготовки відбувається подряпання металу одночасно великою кількістю абразивних частинок. Основними видами взаємодії абразивних зерен з металом є мікрорізання зі зняттям найтонших стружок та тертя з пластичним відтиском металу.

Хонінгування застосовують для отримання поверхонь з шорсткістю $Ra = 0,16 - 0,32$ мкм, також розроблені дрібнозернисті бруски, за допомогою яких здійснюється оздоблювальне хонінгування $Ra — 0,06 - 0,1$ мкм. Відхилення від круглості оброблюваної поверхні досягається в межах 1 мкм, хвилястість менше 0,2 мкм, відхилення від циліндричності та прямолінійності, що утворює менше 2-5 мкм. [4, 8].

До переваг процесу слід віднести також і те, що в результаті хонінгування навіть із застосуванням звичайних абразивних брусків термін служби пар, що труться, збільшується в порівнянні з терміном служби, який має місце при використанні інших методів остаточної обробки. Особливістю процесу хонінгування є повне або часткове взаємне контактування

оброблюваної поверхні деталі та ріжучої поверхні брусків, що забезпечується конструктивно за рахунок чотирьох або двох ступенів свободи, що повідомляються інструменту щодо деталі, що обробляється, або навпаки [7]. При хонінгуванні інструмент і деталь само встановлюються, що забезпечує високу точність отворів, що обробляються. При цьому відпадає необхідність редагування інструмента, а припуски можуть бути зведені до мінімуму.

Постійний контакт бруска з деталлю по всій або більшій частині робочої поверхні сприяє підвищенню продуктивності обробки та точності форми деталей. В процесі хонінгування здійснюється тиск бруска на отвір деталі в межах $0,1 \dots 1$ МПа, що в $10 \dots 100$ разів менше, ніж тиск при шліфуванні. Швидкість різання при обробці брусками $10 \dots 100$ мм-хв, тобто $15 \dots 100$ разів нижче, ніж під час шліфування. В результаті при хонінгуванні температура в зоні обробки значно нижча, ніж при шліфуванні і не перевищує $150 \dots 200^\circ\text{C}$. Таким чином, відсутні фізичні причини утворення в поверхневому шарі мікротріщин і припалів, а також залишкових напружень розтягування.

Визначимо основні переваги прецизійної обробки деталей брусками, у тому числі і хонінгування:

1. При хонінгуванні велика контактна поверхня брусків у поєднанні з правильно обраною кінематикою відносного руху дозволяє ефективно забезпечувати виправлення вихідних похибок форми у поперечному та поздовжньому напрямках, що знижує контактні напруження під час експлуатації машин.
2. При хонінгуванні можливо за одну установку обробляти кілька співвісних отворів, при цьому точність обробки не залежить від їхнього розташування, оскільки відсутні прогини оправок, шпинделя тощо.
3. Відпадає необхідність у спеціальній правці ріжучої поверхні брусків, тому що при правильно вибраних умовах і режимах обробки рельєф ріжучої поверхні брусків самовідновлюється циклічно.

4. Якість поверхні деталей після обробки брусками змінюється у дуже вузькому інтервалі, тобто деталі мають велику стабільність і однорідність за своїми експлуатаційними властивостями, що дуже важливо для умов масового та велико серійного виробництва.

5. Не висуваються високі вимоги до попередньої установки деталей на верстаті, оскільки схеми закріплення деталей та інструменту, що застосовуються, забезпечують їх само установку.

1.2. Вершинне алмазне хонінгування

Прогресивним методом підвищення техніко-експлуатаційних показників пар, що працюють в умовах тертя, є формування на отворах мікропрофілю, який являє собою чергуються плоскі виступи з поглибленнями для розміщення мастила [10]. При цьому збільшуються маслоємність і опорна площа обробленої поверхні, внаслідок чого скорочується тривалість приробітку, підвищується зносостійкість циліндрів і збільшується ресурс насоса.

Поверхню такого типу можна одержати методом вершинного хонінгування. Нерівності мікропрофілю формуються на операції попереднього хонінгування алмазними брусками високої зернистості на металевій зв'язці. Потім вони притуплюються алмазними брусками меншої зернистості на еластичній зв'язці ВЗ-07 або брусками з жорстким алмаз утримуючим шаром і еластичним підшаром (напівеластичними брусками).

Важливою особливістю вершинного хонінгування є можливість управління мікрорельєфом оброблюваної поверхні та забезпечення необхідного поєднання величини опорної площі та маслоємності поверхні. Останнє має особливе значення для поверхонь сполучення, що працюють в умовах тертя.

Технологія вершинного хонінгування включає дві операції: попереднє хонінгування для отримання вихідної шорсткості поверхні $Ra\ 1,5\ \mu m$ і чистове хонінгування для формування кінцевої мікрогеометрії поверхні з

шорсткістю R_a — 1,25...0,02 мкм [2, 3, 8, 9]. Чистова обробка ведеться брусками на еластичній зв'язці або напівеластичні хонінгувальні бруски в межах вихідної висоти мікронерівностей. Розмір шорсткості поверхні зменшується в 2,5...3,5 рази. Така технологія обробки дозволяє отримати поверхні з відносною довжиною опорної профілю до 80 % на відносному рівні перерізу 15 %. Вихідний мікропрофіль поверхні та мікропрофіль, що утворюється при вершинному хонінгуванні, представлені на рис. 1.1.

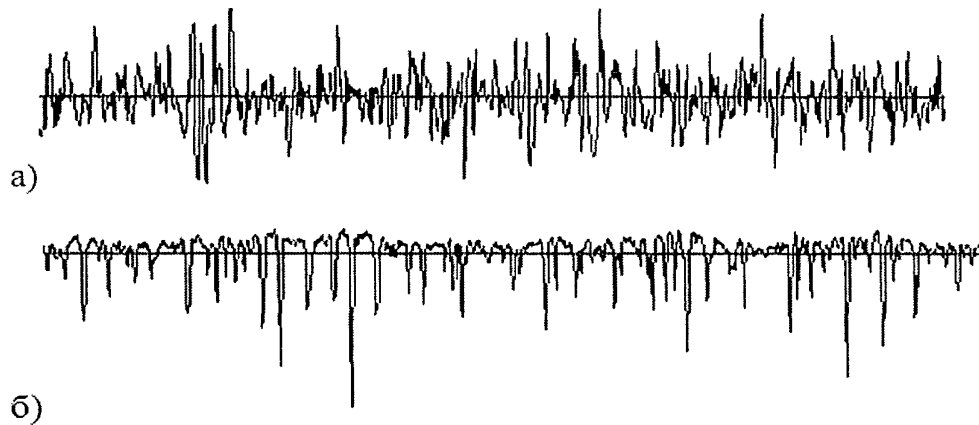


Рисунок 1.1 - Мікропрофіль поверхні отриманий після попереднього хонінгування брусками на металевій зв'язці (а) та мікропрофіль поверхні після вершинного хонінгування (б)

Вершинне хонінгування відноситься до оздоблювальних методів обробки, видалення шару матеріалу відбувається в межах вихідної шорсткості, тому точність і геометрична форма отворів, що обробляються, практично не змінюються. Точність розмірів та точність геометричної форми мають бути забезпечені на попередніх операціях.

Дослідження Чистова В.Ф. [1, 2, 14] показують, що бруски на еластичній зв'язці для чистового хонінгування рекомендується застосовувати в тих випадках, коли вихідна шорсткість знаходиться в межах $R_a < 0,6...0,8$ мкм. Еластичні бруски виготовляються у вигляді блоків (рис. 1.2) [5, 3]. зернам занурюватися під дією сил різання в пружний алмазо місткий шар і отримувати дуже малі глибини різання в межах вихідної шорсткості поверхні (до 3...5 мкм). похибки геометричної форми. конструкції бруска створюється низка особливостей цього процесу.

Н.Г. Жолобов [2,8] зазначає, що на продуктивність процесу хонінгування еластичними брусками великий вплив має вихідна шорсткість поверхні. Повторимося, що цей процес найефективніший за порівняно невеликої вихідної шорсткості, в межах R_a — 0,16...0,63 мкм . При збільшенні вихідної шорсткості продуктивність різко знижується. Ефективне регулювання форми мікропрофілю можливо здійснити лише за малої вихідної шорсткості. Ця проблема вирішується застосуванням напівеластичних брусків.

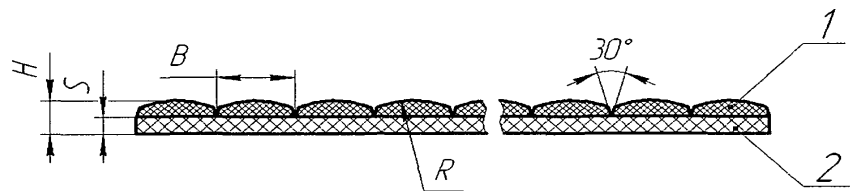


Рисунок 1.2. Алмазні хонінгувальні блок-бруски (АББХ), що мають ширину - B , товщину алмазного шару - S , загальну висоту - H ; 1 – алмазо вмісний шар, 2 - еластичний підшар

1.3. Особливості процесу вершинного алмазного хонінгування напівеластичними брусками

Напівеластичний алмазний брусок (рис. 1.3) складається з корпусу, еластичного підшару і жорсткого алмазо вмісного шару, виконаного у вигляді прокату, що деформується. Наявність еластичного підшару та мала товщина жорсткого алмазо вмісного шару забезпечують при певному тиску повне прилягання робочої поверхні бруска до поверхні отвору, що обробляється. Відсутність занурення алмазних зерен у жорсткий алмазо вмісний шар під дією сил різання дозволяє обробляти поверхні з порівняно великою вихідною шорсткістю.

Алмазо вмісний шар напів еластичних брусків (рис. 1.4, в) за своїми властивостями наближений до алмазо вмісного шару бруска на металевій зв'язці. Діамантові зерна не занурюються в нього під дією сил різання і глибина різання кожним зерном зростає. Однак, при збільшенні твердості алмазо вмісного шару зменшує не тільки мікро-, але й макро

еластичність, тому хонінгувальний брусок повинен мати алмазо вмісний шар з великою твердістю зв'язки (без мікро еластичності), але в той же час досить еластичний, щоб повторювати макро нерівність поверхні отвору. Що й забезпечується конструкцією напівеластичного хонінгувального бруска.

Напівеластичні алмазні бруски мають ряд особливостей [2, 3, 8], які відрізняють їх від широко поширених алмазних хонінгувальних брусків на металевих та органічних зв'язках, а також від еластичних алмазних брусків на каучуковмісних зв'язках з еластичним підшаром. До відмінностей від алмазних брусків на металевій зв'язці відноситься мала жорсткість алмазного шару, висока еластичність підшару, деформація бруска при стисканні.

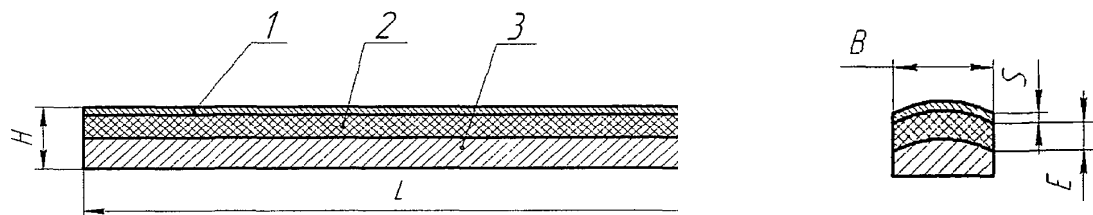


Рисунок 1. 3. Конструкція напівеластичного бруска, що має довжину L , ширину B , товщину алмазного шару S , товщину еластичного шару E , загальну висоту H ; 1 - жорсткий алмазо вмісний шар, 2 - еластичний підшар; 3 - жорстка основа.

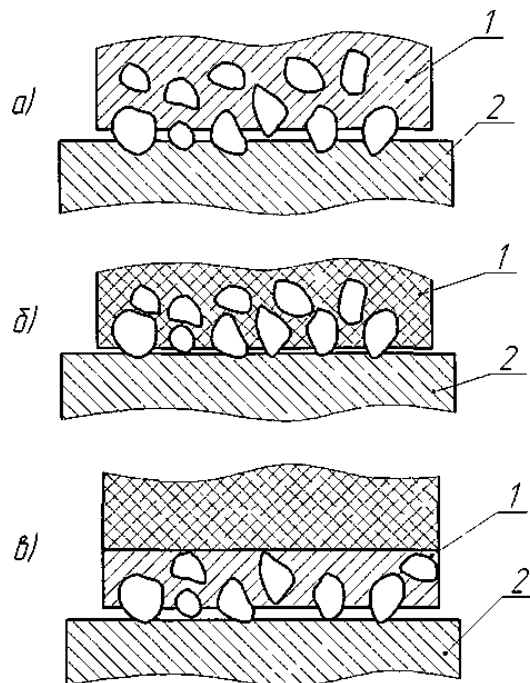


Рисунок 1.4 - Схема контакту алмазного бруска (1) та деталі (2) при хонінгуванні: а) брусок на металевому зв'язуванні; б) брусок на еластичній зв'язці; в) напівеластичний брусок.

Відмінністю від еластичних брусків є відсутність можливості занурення алмазних зерен в алмазо вмісний шар під дією сил різання. Напівеластичний алмазний брусок є чимось середнім між брусками на металевих і еластичних зв'язках алмазними хонінгувальними брусками.

Закономірності процесу оздоблювального хонінгування брусками на металевих та еластичних зв'язках не можуть повною мірою описати вершинне хонінгування напівеластичних алмазних брусків.

Найважливішими конструктивними елементами напівеластичного бруска є товщина еластичного підшару та товщина жорсткого алмаз утримуючого шару. Товщина еластичного підшару певному тиску повинна забезпечувати повне прилягання робочої поверхні бруска до поверхні оброблюваного отвору. Виходячи з цього виведена розрахункова формула для визначення товщини еластичного підшару [2, 8, 9]:

$$h = 0,79 \frac{E}{P_H} \left[\sqrt{r_o^2 - b^2/4} - \sqrt{r_b^2 - b^2/4} - (r_o - r_b) + \Delta h - \frac{\Delta d}{2} \right]$$

де E -модуль пружності матеріалу еластичного підшару;

P_H - робочий тиск напівеластичних брусків;

r_o - радіус отвору, що обробляється;

r_b - радіус напівеластичних брусків;

b - ширина бруска;

Δh – допуск виготовлення бруска по товщині;

Δd - допуск на виготовлення отвору.

При меншій товщині підшару повне прилягання поверхні бруска та отвору не буде забезпечене та продуктивність процесу знизиться. При збільшенні товщини підшару понад оптимальну показники процесу не

повинні погіршуватися, проте при значному її збільшенні знизиться жорсткість технологічної системи та можуть виникнути небажані вібрації.

Для визначення оптимальної товщини жорсткого алмазо вмісного шару виведена формула, що зв'язувала товщину і тиск необхідний для деформації жорсткого алмазо вмісного шару [2, 9]:

$$\Delta P_{ж} = \frac{10,7 E_{np} h_{ж}^3 \left[\sqrt{R_o^2 - b^2/4} - \sqrt{R_6^2 - b^2/4} - (R_o - R_6) \right]}{b^4},$$

де $\Delta P_{ж}$ - приведений модуль пружності алмазо вмісного шару;

h - товщина жорсткого алмазо вмісного шару.

Робочий тиск напівеластичних брусків на деталь значно впливає на показники процесу вершинного хонінгування. При оптимальному тиску забезпечується повне прилягання робочої поверхні бруска до поверхні отвору, що обробляється. При збільшенні тиску над оптимального контурна площа контакту бруска та отвору не збільшиться. Однак можуть збільшитися фактична площа контакту і глибина впровадження алмазних зерен в поверхню, що обробляється, що призведе до деякого підвищення продуктивності.

Зернистість алмазів напівеластичних брусків є одним з найбільш суттєвих факторів, що впливають на умови формування мікропрофілю поверхні при вершинному хонінгуванні.

При надмірно великій зернистості глибина впровадження алмазних зерен в поверхню, що обробляється, буде великою і на майданчиках опорної поверхні може з'явитися «нова шорсткість», яка істотно знизить відносну опорну довжину профілю. Алмазні зерна напівеластичних брусків оптимальної зернистості будуть впроваджуватись у виступи вихідної шорсткості на меншу глибину. Тому величина «нової шорсткості» на майданчиках опорної поверхні буде менше, а відносна опорна довжина профілю більше. І, нарешті, алмазні зерна брусків дуже малої зернистості впровадяться в оброблювану поверхню на дуже малу глибину.

Внаслідок цього вони будуть незначно знижувати вихідну шорсткість і відносна опорна довжина профілю також буде малою. Чим більший розмір вихідної шорсткості і твердість оброблюваного матеріалу, тим більше можна призначати зернистість.

У роботі [2, 8] наголошується, що процес вершинного хонінгування напівеластичними алмазними брусками забезпечує зниження вихідної шорсткості при обробці сталей у 2,7...3,5 рази, при обробці чавуну 3,8...3,0 рази при вихідній шорсткості не більше $Ra=0,8...2,0$ мкм. Вершинне хонінгування напівеластичними алмазними брусками однаково ефективно як після попереднього хонінгування брусками на металевій зв'язці, так і після розточування отвору. Величина опорної довжини профілю при цьому досягає 70 ... 80% на відносному рівні перерізу 15%.

1.4. Аналіз впливу характеристики напівеластичних алмазних брусків і параметрів процесу на шорсткість поверхонь, що хонінгуються.

Дослідження Желобова Н.Г. [2, 8] показують, що найважливішим фактором, що впливає на показники процесу є характеристика алмазних брусків: зернистість, товщина еластичного підшару та жорсткого алмаз утримуючого шару. Дослідження проводилися за схемою із постійним тиском брусків на деталь, матеріал – сталь ХВГ.

Зернистість брусків дуже впливає на шорсткість обробленої поверхні (рис. 1.5).

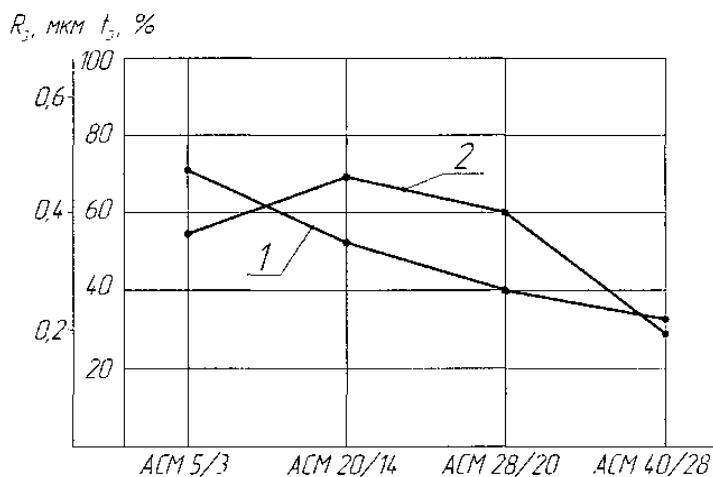


Рисунок 1.5 - Залежність шорсткості (1) та відносної опорної довжини профілю(2) від зернистості напівеластичних брусків. [2, 8]

При використанні брусків з малою зернистістю зниження шорсткості та збільшення опорної довжини порівняно невелике, оскільки відбувається не різання, а випрасування.

При зернистості 20/14 та 28/20 відбувається зниження шорсткості та збільшення відносної опорної довжини порівняно з вихідними значеннями {Ra – 1,22 мкм, t_p – 12 %}. При зернистості брусків 40/28 відбувається різке зниження шорсткості внаслідок збільшення глибини різання та незначне збільшення відносної опорної довжини через безперервне різання.

Товщина еластичного підшару — це один із конструктивних параметрів напівеластичного бруска, який впливає на показники процесу (рис. 1.6).

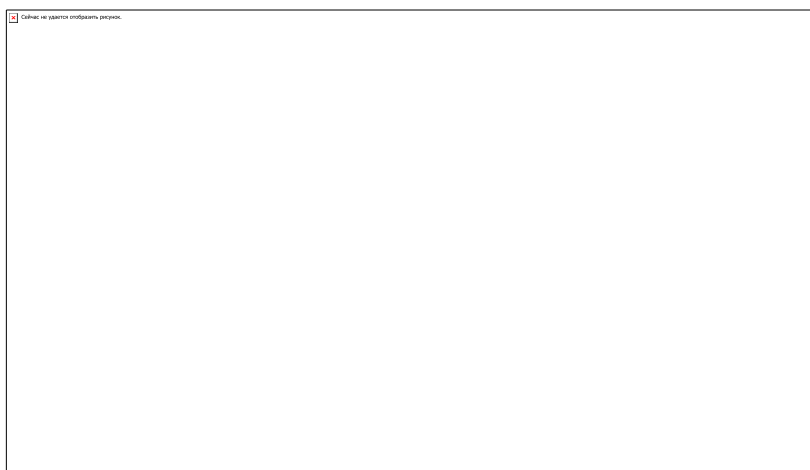


Рисунок 1.6 - Залежність шорсткості (1) та відносної опорної довжини профілю (2) від товщини еластичного підшару. [2, 8]

Зі збільшенням товщини еластичного шару показники процесу покращуються, це відбувається через збільшення площі прилягання, отже, і збільшення кількості зерен що у приймають участь у різанні. При збільшенні товщини підшару, при якому забезпечується повне прилягання, показники процесу практично не змінюються.

Вплив товщини жорсткого алмазо вмісного шару на шорсткість обробленої поверхні ілюструє рис. 1.7. Товщина алмаз утримуючого шару менше 0,15 мм нетехнологічна, у місці з тим при збільшенні товщини понад 0,25 мм помітно знижується відносна опорна довжина профілю і підвищується шорсткість, напівеластичний брусок працює зв'язці. Оптимальним варіантом є товщина алмазо вмісного шару в межах 0,15...0,25 мм.

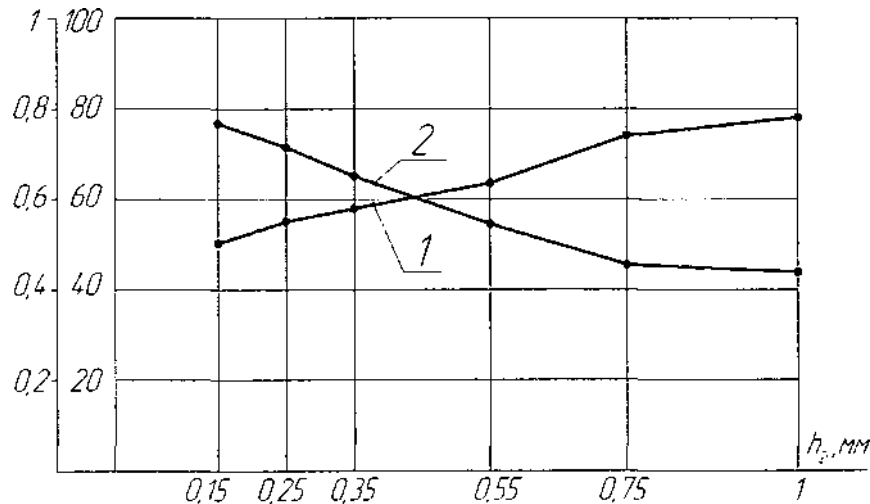


Рисунок 1.7 – Залежність шорсткості (1) і відносної опорної довжини профілю (2) від товщини жорсткого алмазо вмісного шару.

Тиск дуже впливає на шорсткість і відносну опорну довжину (рис. 1.8). Зі збільшенням тиску шорсткість різко зменшується, а відносна опорна довжина — збільшується, це пояснюється збільшенням площі контакту бруска та оброблюваної поверхні.

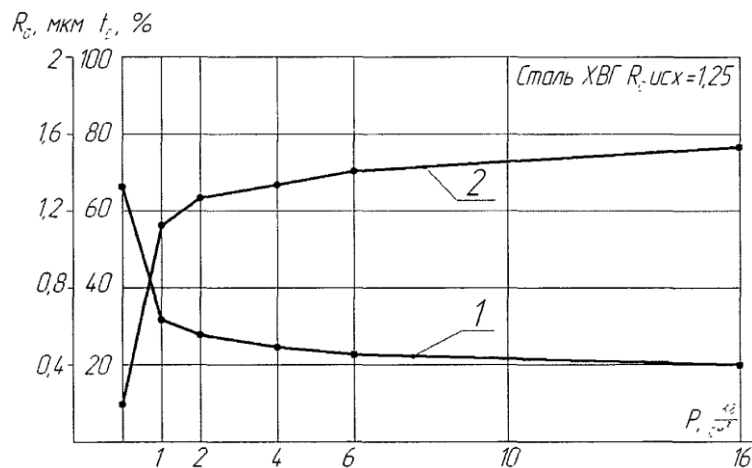


Рисунок 1.8 - Залежність шорсткості (1) та відносної опорної довжини профілю (2) від тиску напівеластичних брусків. [2, 8]

При подальшому збільшенні тиску показники процесу продовжують покращуватись, але вже незначно. Це пояснюється тим, що площа контакту бруска та оброблюваної деталі не збільшується, а покращення показників процесу відбувається через збільшення глибини різання.

Досліджень впливу швидкості поворотно-поступального руху та обертального руху показало, що збільшення швидкостей незначно впливають на параметри шорсткості.

1.5. Нанесення регулярного мікрорельєфу за допомогою хонінгування

Головне завдання при відновленні циліндрів – отримати якомога пряміші стінки (без конусності), круглі отвори (з мінімальною деформацією, що особливо важливе сьогодні, коли використовуються тільки кільця низького тертя), правильну кількість і якість штрихування для хорошого маслоутримання, а також така якість поверхні, яка відповідає вимогам довговічності кілець. Все це досягається розточуванням і/або хонінгуванням циліндрів в один або декілька етапів із застосуванням різних типів абразивів (керамічних або алмазних).

Хонінгування – фінішна операція, при якій забезпечують необхідний розмір циліндра, досягаються мінімальні відхилення від круглості і циліндричності, формується спеціальний мікрорельєф і забезпечується певна структура металу на поверхні циліндра. Якщо використовувати абразивні (не діамантові) бруски, то, в більшості випадків, хонінгування відбувається в три етапи. Коротко їх можна описати так:

Велику частину припуска знімають брусками з відносно крупним абразивом. При цьому циліндр повинен придбати правильну форму, тобто відхилення від круглої і циліндричності повинні звестися до мінімуму. Після такої обробки мікрорельєфом поверхні циліндра є чергування високих гострих виступів і глибоких западин.

Потім обробку продовжують брусками з дрібнішим абразивом. На цьому етапі остаточно виводять правильну форму циліндра. Мікрорельєф поверхні після цього етапу є чергуванням западин (причому глибина западин теж чергується) і щодо «плоских» виступів. Таким чином досягається збільшення площі опорної поверхні циліндра (відносна опорна довжина профілю t_p). Тобто, теоретично кожен виступ повинен бути трапецієвидної форми. Проте, для нормальної роботи циліндропоршневої групи така форма виступів не ідеальна. Для цього, на завершальній стадії обробки переходять до крацювання..

Крацювання – процес скруглення вершин трапецієвидних виступів мікрорельєфу поверхні циліндра, а також звільнення западин від частинок абразиву і найдрібніших частинок металу спеціальними щітками. Під час цієї процедури зміна діаметру циліндра практично не відбувається. Отриманий таким чином мікрорельєф здатний утримати максимальну кількість моторного масла на стінках циліндра за умови, що основні параметри шорсткості поверхні (R_a , R_z і t_p) витримані в межах допустимих значень, які можна проконтролювати за допомогою спеціального приладу – профілометра. Крім того, щітки для крацювання повинні зняти дефектний шар металу з поверхні виступів, оголивши таким чином графіт.

1.6. Задачі дослідження.

1. Проведені експериментальні дослідження процесу хонінгування, визначивши вплив параметрів процесу та властивостей брусків: концентрації алмазів, кута сітки хонінгування та часу на величину шорсткості.

2. Дослідити вплив зв'язки алмазних хонінгувальних брусків на висотні параметри оброблюваної поверхні

3. Визначити оптимальні параметри алмазних брусків, що забезпечують найкращі трибологічні характеристики поверхні гільз циліндрів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вибір зразків для проведення дослідження

Для проведення дослідження процесу хонінгування застосовувались гільзи циліндрів двигунів присутніх на підприємстві (рис 2.2.).

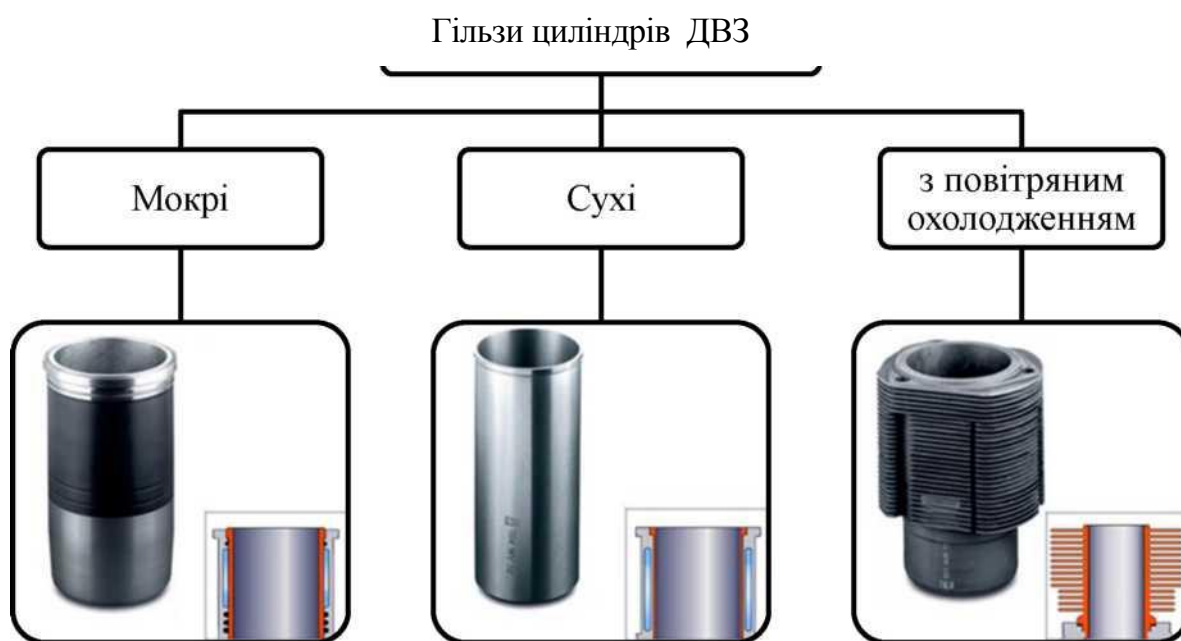


Рис. 2.1- Зразків для проведення дослідження

Експериментальні дослідження проводилися з метою:

1) визначення впливу технологічних параметрів алмазного хонінгування циліндрів на показники процесу, що суттєво впливають на зносостійкість пари циліндр - поршень. Зокрема, було проведено дослідження впливу умов хонінгування на параметри шорсткості, пов'язані:

- з висотними властивостями нерівностей (середнє арифметичне

відхилення профілю R_a , найбільша висота нерівностей профілю R_{max} , середнє квадратичне відхилення профілю R_g);

- з властивостями нерівностей у напрямку довжини профілю (середній крок нерівностей S_m , середня довжина хвилі профілю λ_a , щільність виступів профілю D ,

- з формою нерівностей профілю (відносна опорна довжина профілю tr ,

2) встановлення закономірностей впливу умов хонінгування на знос алмазних брусків та продуктивність алмазного хонінгування;

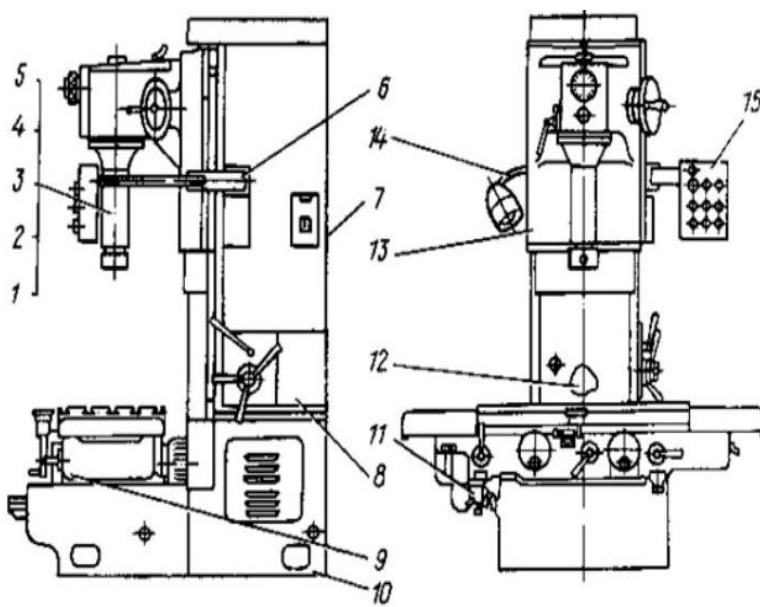
3) дослідження впливу мікропрофілю вихідної поверхні циліндрів після хонінгування на зносостійкість пари циліндр – поршень.

2.2. Вибір верстатного устаткування, пристосувань та ріжучого інструменту для дослідження процесу хонінгування

Для дослідження процесу хонінгування застосовувались гільзи, розточені на вертикальному розточному верстаті 2Е78П (рис. 2.2.) за допомогою алмазних різців.



а



б

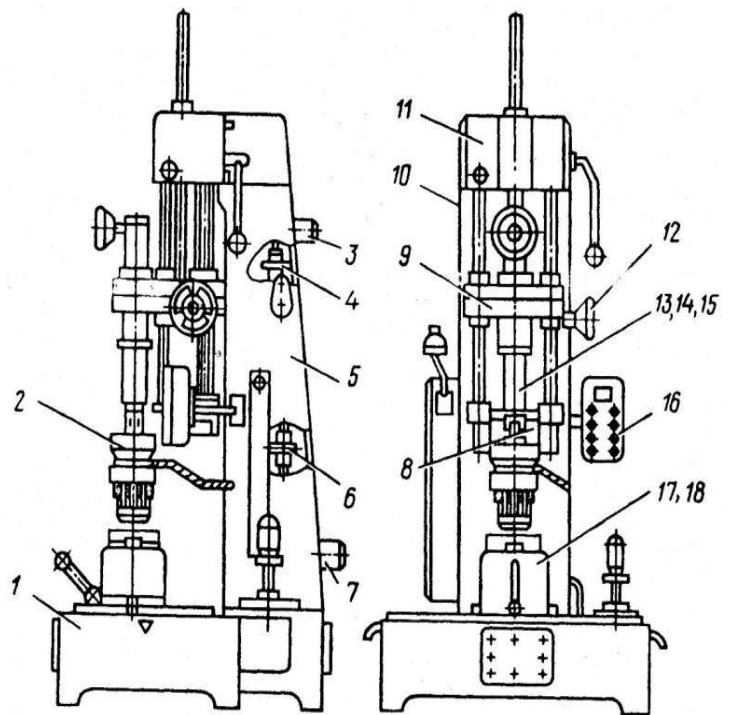
Рисунок 2.2 - Вертикальний розточний верстат 2Е78П: а) загальний вигляд; б) компоновальна схема: 1, 2, 3, 4,5 - змінні шпинделі діаметрами: 48 мм, 78 мм, 120 мм, шпиндель універсальний, шпиндель спеціальний; 6 - пульт управління; 7 - електроапаратура панелі; 8 – колона; 9 – стіл; 10 – основа; 11 –

рахунковий пристрій, 12 - коробка швидкостей і подач; 13 - шпіндельна бабка; 14 –електрообладнання, 15 - панель пульта

Застосування алмазних різців обумовлено високою точністю і чистотою обробки для забезпечення мінімального припуску на хонінгування. Хонінгування проводили з застосуванням хонінгувального верстата 3К833 (рис. 2.3).



а



б

Рисунок 2.3 - Хонінгувальний верстат 3К833а) загальний вигляд; б) компоновальна схема: 1 – основа, 2 - пристрій для охолодження хонінговальної головки; 3 - привід коробки подач; 4 - механізм натяжки приводу коробки подач; 5 – колона; 6 - механізм натяжки приводу редуктора; 7 - привід редуктора; 8 – редуктор; 9 – повзун, 10 - плита у зборі; 11 - коробка подач, 12 - привід механізму ручного введення хони; 13 – повідець; 14 - повідець для хонінгувальних головок; 15 - електроустаткування; 17 - пристрій для хонінгування гільз, 18 - пристрій для кріплення блоків.

Механічну обробку проводили з застосуванням хонінгувальних головок (рис. 2.4.)

Хонінгувальна головка складається з корпусу 1, в зовнішніх пазах 2 якого розміщені колодки 3 з алмазними брусками 4. Фіксація брусків на

колодках в осьовому напрямку здійснюється притисними планками 5 та болтами 6, котрі затискають брусок в пазах колодки. В центральному отворі корпусу розміщений шток 7 з двома розтисними роликами 8, при осьовому переміщенні яких по конусній поверхні колодок здійснюється розжим брусків. Від випадання з корпусу колодки із брусками утримуються кільцевими пружинами 9. Конструкції головок для різних типів брусків принципово ідентичні і відрізняються кількістю брусків в залежності від діаметрів гільз.

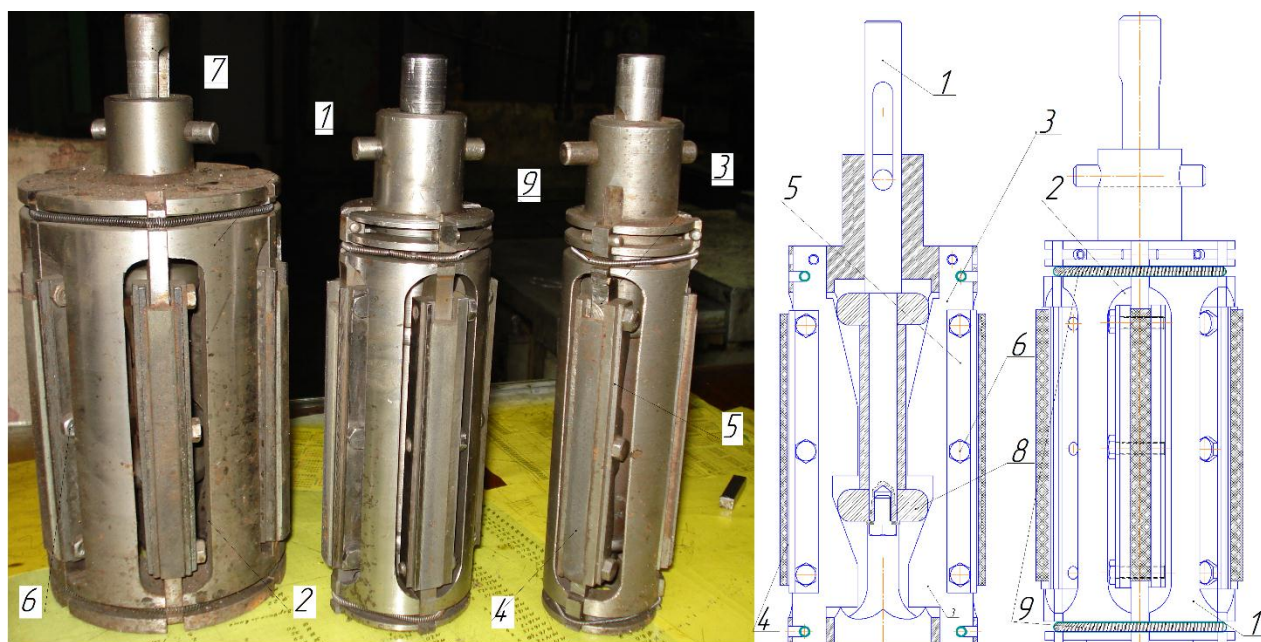


Рис. 2.5. Інструменти для хонінгування гільз циліндрів ДВЗ різних діаметрів (позначення в тексті)

В якості ріжучого інструменту для хонінгування застосовувались алмазні бруски різної зернистості та на різних зв'язках (рис. 2.6.; таб. 2.1.).

Таблиця 2.1. Характеристики алмазних брусків

№ п/п	Вид алмазів	Зернистість	Концентрація	Зв'язка
1	АС 4	100/80	100	М2-01
2	АС 4	80/63	100	М2-01
3	АС 4	63/50	100	М2-01
4	АС 4	63/50	50	М2-01
5	АС 4	63/50	25	М2-01

6	AC 4	50/40	100	M2-01
7	ACM	28/20	100	B3-07
8	ACM	20/14	100	B3-07
9	ACM	40/28	100	B2-01
10	AC15	100/80	100	B2-01



а

Шорсткість оброблюваної поверхні Ra, мкм	Зернистість бруски зі зв'язкою		
	органічною	металевою	керамічною
0,63—1,25	200/160—125/100	160/125—125/100	160/125—125/100
0,32—0,63	160/125—100/80	125/100—80/63	125/100—80/63
0,16—0,32	100/80—50/40	80/63—50/40	80/63—50/40
0,08—0,16	50/40—40/28	-	63/50—40/28
0,04—0,08	40/28—14/10	-	-
0,04	14/10—5/3	-	-

б

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд та характеристики алмазних брусків

2.3. Прилади для контролю параметрів шорсткості поверхні

Вимірювання шорсткості обробленої поверхні проводилося за допомогою профілометра моделі 130 (Рис. 2.7). Даний профілометр оснащений інформаційно-обчислювальним блоком, що підключеним до комп'ютера і дозволяє здійснювати управління датчиком в процесі вимірювання і обробки сигналу вимірювальної інформації.



Рис. 2.7. Профілометр моделі 130

Методика вимірювання шорсткості поверхні. Вимірювання шорсткості поверхні циліндра проводилося на профілометр 130 у чотирьох перерізах на відстані від торця зразка 35 та 95 мм. Профілометр оснащений інформаційно-обчислювальним блоком, який підключений до комп'ютера та призначений для управління датчиком в процесі вимірювання і обробки сигналу вимірювальною інформації (Рис.36).

Технічні параметри	
Діапазон роботи:	5...14 клас по ГОСТ 2789, ступінь точності 1, тип стаціонарний/переносний
Трасування:	довжина 0.5–12.5 мм, точність до 0,1 мкм, швидкість 0.5, 1, 2 мм/с, відсічка 0.08–8 мм
Стандартний зонд:	голка 10 мкм, зусилля 4 мН, опора 125 мм, отв.3мм/глиб. 20 мм, отв.10 мм/глиб.100 мм
Список параметрів:	Клас шорсткості, R_a , R_z , R_q , R_{max} , R_y , R_p , R_v , R_m , R_{pk} , R_k , R_{vk} , S , S_m , p , tp , $tp1$, $tp2$, Δa , Δq , $L0$, $l0$, λa , λq , D , Dp , r , Q , Wt , Wa , Wq , Swm
Діапазони/точність:	0.012..50 мкм /2% (R_a, R_q); 0.025..125 мкм /3% (R_p, R_v); 0.05..250 мкм /3% (R_z, R_{max}); 10...1600 мкм / 2% (S , S_m); 0.01..30 град (Δa , Δq); 1..100 /8% (tp)
Комп'ютер:	від Pentium-266 з Windows 98 до сучасних комп'ютерів з Windows 7
Комплектація:	датчик, мотопривід, стійка з призмою, електроніка, програма, міра, паспорт
Живлення та вага	живлення від комп'ютера, не більше 20Вт; вага в упаковці – 17 кг

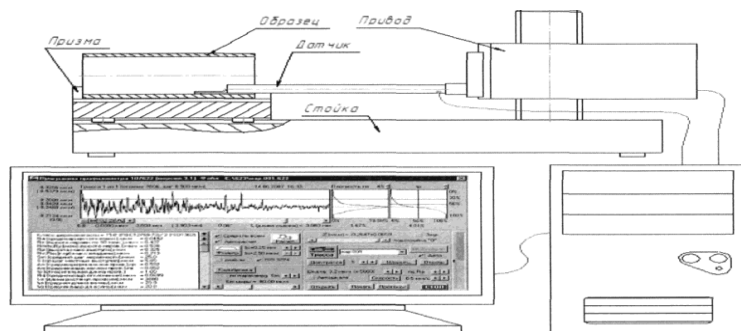


Рисунок 2.8 - Схема вимірів

При цьому виконується вимір профілю і вивід його на екран, вираховувались параметрів шорсткості, аналіз геометричних особливостей профіля і роздруківка їх на принтері (Рис.2.8).

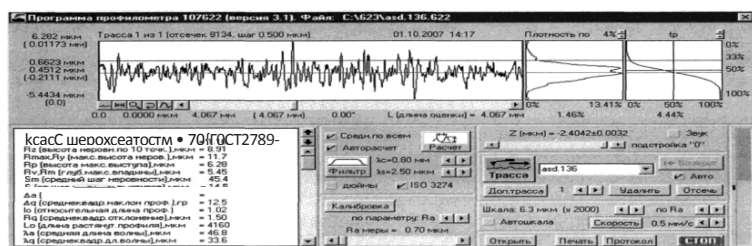


Рисунок 2.9 - Вивід на дисплей показчиків шорсткості

Прилад призначений для вимірювання параметрів шорсткості поверхонь попередніх слідів обробки, та вздовж утворюючої циліндра.

Визначалися всі параметри шорсткості поверхні за ГОСТ 2789-73 і ГОСТ 25142-82 згідно технічної характеристики профілометра.

Для оцінки мікропрофілю поверхні циліндрів застосовувалися параметри шорсткості [2,3], зв'язані:

з висотними властивостями нерівностей (середнє арифметичне відхилення профілю, найбільша висота нерівностей профілю, середнє квадратичне відхилення профілю);

з властивостями нерівностей у напрямі довжини профілю (середній крок нерівностей, середня довжина хвилі профілю, щільність виступів профілю);

з формою нерівностей профілю (відносна опорна довжина профілю).

Мікро профіль поверхні оцінювали шорсткістю всієї поверхні R_a , шорсткістю поверхні між масляними кишнями R_z (по профілограмам), відносною опорною величиною профілю t_p на різних рівнях і висотою (глибиною) масляних кишень (рисок), середньою шириною рисок (по профілограмам).

Якість поверхні циліндра оцінювали за допомогою кривої Аббота. Ця крива показує залежність відносної площі мікро западин від їх глибини. При плосковершинном хонінгуванні поверхні виступів згладжуються, і на мікро профілі дзеркала циліндра є два види шорсткостей: основна по западинах і опорна по згладжених виступах

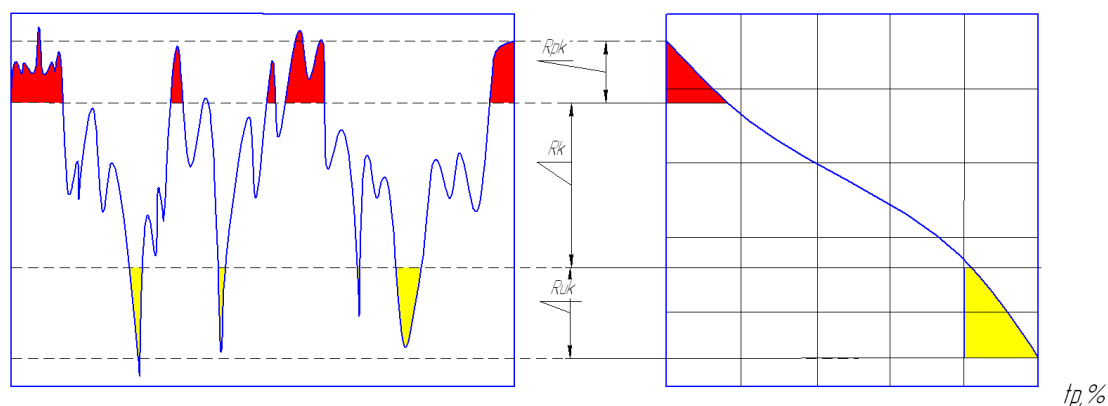


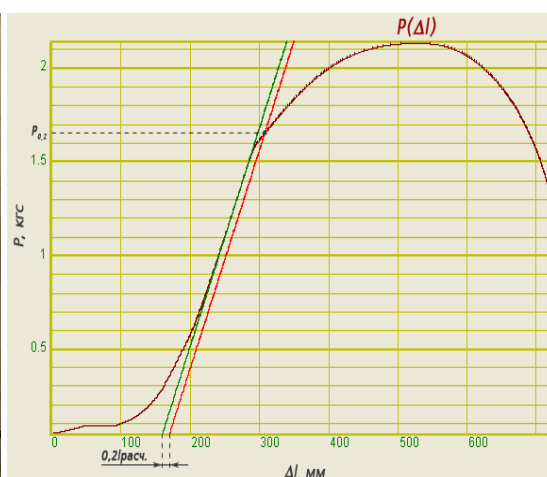
Рисунок 2.10 - Методика оцінки мікро профілю поверхні по кривій Аббота згідно міжнародного стандарту TN ISO 13565-21996 (DIN 4776)

Зразки, оброблені методом плоско вершинного хонінгування, мали наступну поверхню: відносна опорна довжина профілю t_p - 50...70 % на рівні перетину профілю $p = 1,0...1,5$ мкм, середня глибина рисок - 2...5 мкм, ширина - 20... 60 мкм, шорсткість між ними (масляними кишеньками) - 0,5... 1,0 мкм (9 ...10 клас), максимальна глибина рисок - до 7 мкм

2.4. Методика та пристосування для проведення трибологічних досліджень

2.4.1. Дослідження зносостійкості.

Зносостійкість поверхневого шару досліджували при терті ковзання на машині тертя СМЦ-2 (рис. . За зразки взяті сектори, вирізані із зразків-втулок з внутрішнім діаметром 43 мм. Їх внутрішня поверхня оброблена звичайним хонінгуванням і плоско вершинним з застосуванням брусків на металевій та вулканітовій зв'язках.



а

б

Рисунок 2.11. Машина тертя СМЦ-2: а) – загальний вигляд; б) – відображення результатів трибологічних досліджень

Режим обробки: окружна швидкість — 22 м/хв, швидкість зворотно-поступального руху — 8 м/хв, тиск — 0,7 МПа, час остаточного хонінгування — 15 с. При звичайному хонінгуванні ($Ra=0,20\ldots 0,24$ мкм, 9а клас) на попередній обробці застосовувалися бруски АСБ 63/50 Мк2 100 %, а на остаточній — АСР 80/63 Р11/р9 50%. Плосковершинне попереднє хонінгування проводили брусками АСБ 125/100 Мк2 100 %, а остаточне — спеціальними антифрикційними брусками. Зразки, оброблені методом плосковершинного хонінгування, мали наступну поверхню: відносна опорна довжина профілю t_p — 50...70 % на рівні перетину профілю $t_p = 1,0\ldots 1,5$ мкм, при цьому середня глибина рисок — 2-5 мкм, ширина — 25-65 мкм, шорсткість плато між існуючими масляними кишнями — 0,5-1,2, максимальна глибина рисок — до 8 мкм. Контр зразки були виготовлені з чавуну і мали хімічний склад, аналогічний чавуну поршневих кілець: С - 2,7...3,2%, Si - 1,1...1,5%, Mn - 0,8...1,2%, Р - 0,20%, S - 0,12%, Сг - 0,30%, Ni - 0,50%. Остаточна обробка поверхні тертя контрзразків — шліфовка для отримання шорсткості $Ra= 0,63$ мкм.

Зносостійкість визначали при окружній швидкості 40,6 м/хв ($n = 300$ хв-1) в умовах граничного тертя. Контактний тиск в парі складав 1 МПа. Як мастило вибрано моторне масло М-8б1 (ГОСТ 10541—78). Його витрата — 1 крапля за 1,0...1,5 хв. Тривалість досвіду — 60...80 год.

Знос оцінювали ваговим методом. Зразки зважували на аналітичних вагах перед проведенням досвіду і через кожних 5 год роботи. Крім того, одночасно оцінювали мікропрофіль поверхні зразків з плосковершинним профілем по профілограмам. Перед зважуванням зразки промивали в бензині Б70 і сушили в шафі при температурі 60...80°C протягом 30...40 хв. Кожен експеримент повторювали п'ять разів.

2.4.2. Методика та стенд для проведення порівняльних випробувань гільз та процесу їх припрацювання

Для визначення характеру припрацювання циліндро-поршневої групи в період обкатки двигунів проведені стендові випробування двигунів з трьома типами гільз: з серійними, відремонтованими за заводською технологією, а також за новою технологією з застосуванням брусків на металевій та вулканітовій зв'язці. Якість прироблення оцінювали по стабілізації гальмівного моменту під час холодної обкатки і по зміні шорсткості робочої поверхні гільз.

Прироблення двигунів проводили на стенді КИ-2139Б по режимах, прийнятих на підприємстві: холодна обкатка при частоті обертання валу — 700 і 900 хв⁻¹ по 15 хв, гаряча на холостому ходу при частоті обертання валу 1200 і 1400 хв⁻¹ по 20 хв. Для мащення двигуна використано масло М-8Б1.

Гальмівний момент визначали при холодній обкатці через кожних 5 хв. Випробуванню піддалися 25 двигунів з гільзами, що мають звичайний профіль, і 25 з гільзами, у яких плосковершинний профіль. Гальмівний момент у двигунів склав відповідно - 78 і 69,6 Н - м, Встановлено також, що стабілізація гальмівного моменту у перших двигунів настає через 20 хв., а у других — через 10 хв. Тобто час холодного прироблення при використанні на двигунах гільз з плосковершинним профілем можна скоротити на 10 хв.

Окрім цього, було випробувано 8 двигунів, у яких 4 гільзи мали звичайний профіль і 4 — плосковершинний. В цьому випадку стабілізація гальмівного моменту наступала через 15 хв., тобто скоротився час обкатки на 5 хв.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА

3.1. Дослідження продуктивності та висотних параметрів процесу хонінгування брусками з металевою та вулканітною зв'язкою

Продуктивність процесу визначалася по величині діаметрального знімання припуску на обробку протягом постійного часу хонінгування, яке було прийнято для всіх дослідів 2 хв (окрім серії експериментів із змінним часом хонінгування).

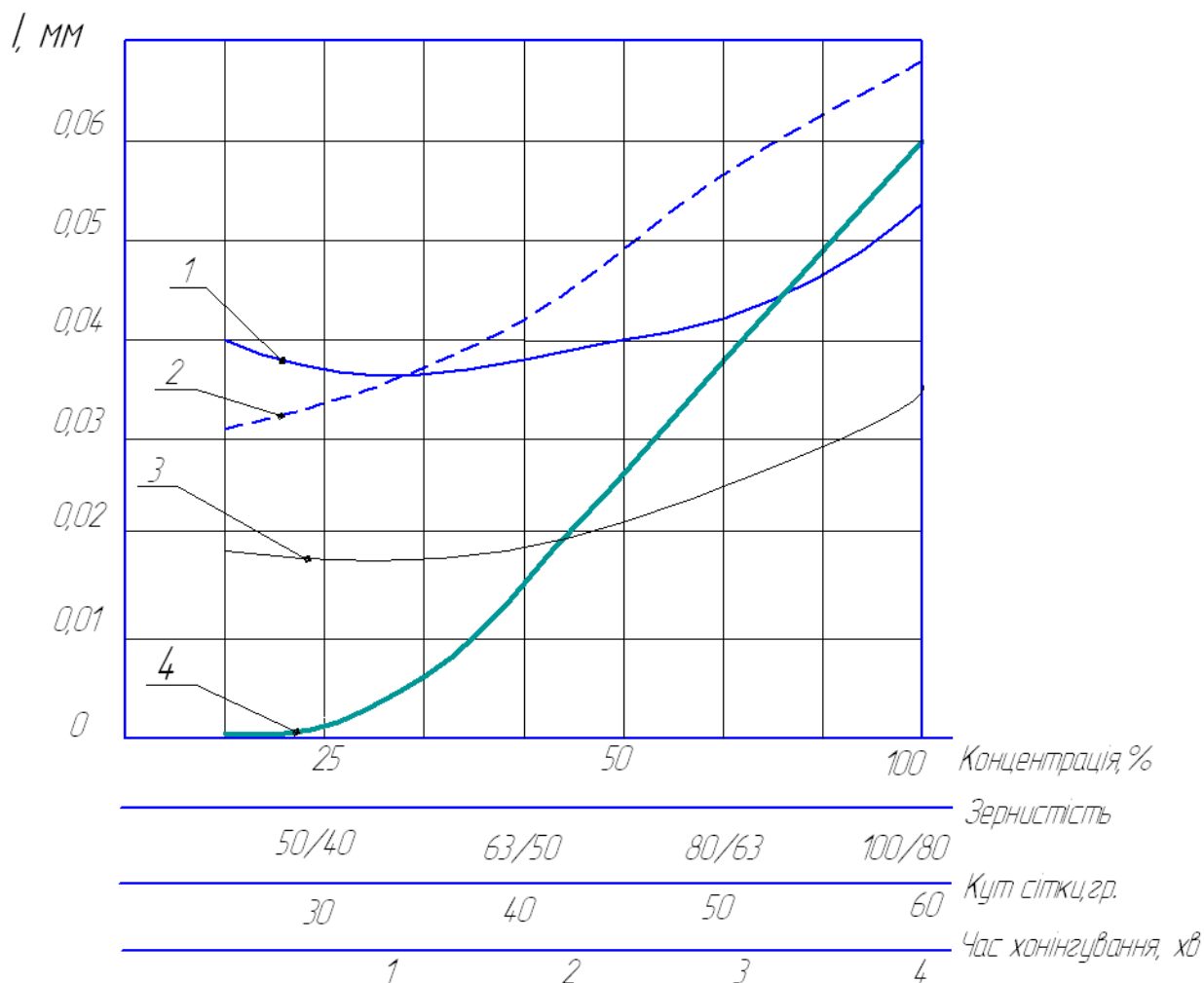


Рисунок 3.1 - Залежність знятого припуску металу від параметрів алмазних брусків: 1 - концентрація зерен алмазів, 2 - зернистість зерен, 3 - кут сітки, 4 - час хонінгування

На рис. 3.1 приведені залежності знімання металу від умов хонінгування, які показують, що із збільшенням концентрації алмазів, розмірів алмазних зерен, кута сітки і часу хонінгування знімання металу зростає.

Проведені дослідження впливу зернистості алмазних брусків, концентрації алмазів, кута сітки і часу хонінгування на параметри шорсткості, пов'язані з висотою нерівностей. Залежність висотних параметрів шорсткості від зернистості приведена на рис. 3.2. При збільшенні розмірів алмазних зерен абсолютні значення висотних параметрів зростають.

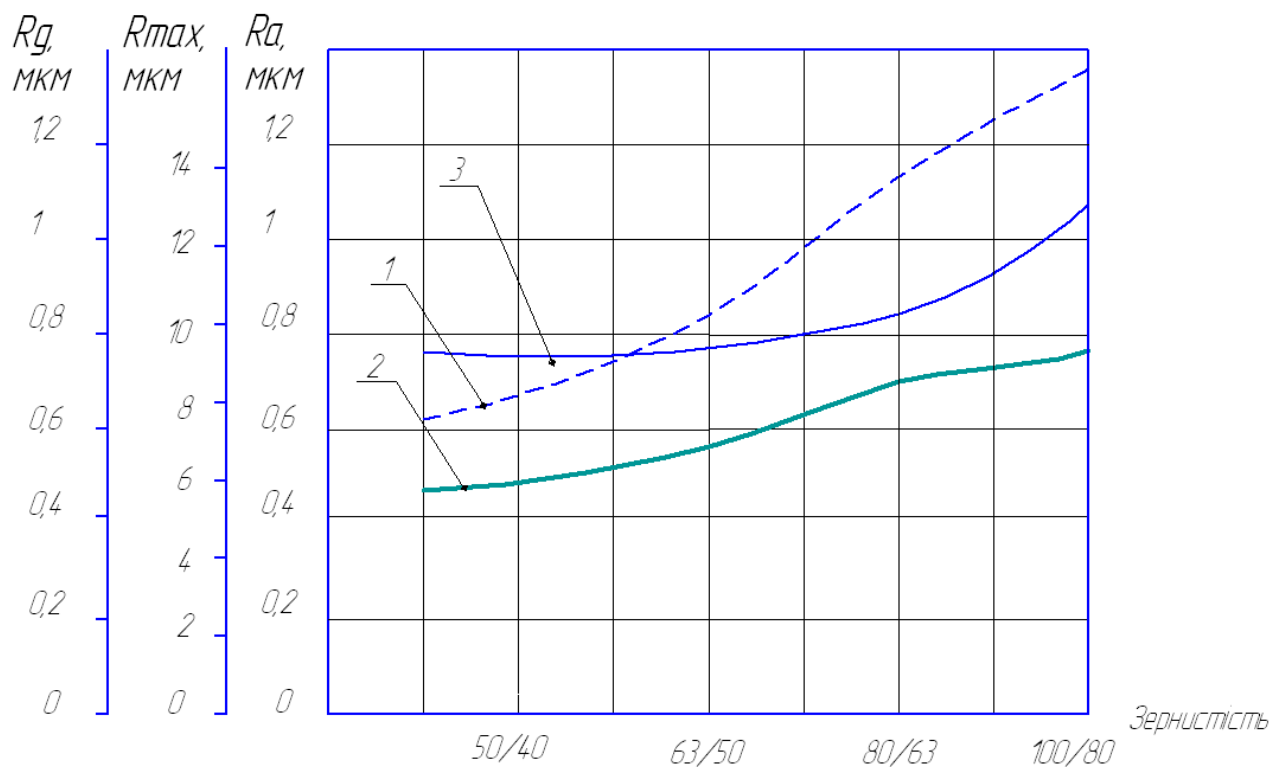


Рисунок 3.2 - Залежність параметрів шорсткості поверхні від зернистості алмазних брусків: 1 - середньо арифметичне відхилення профілю Ra , мкм 2 - найбільша висота нерівностей профілю $Rmax$, мкм, середньо квадратичне відхилення профілю Rg , мкм

Концентрація алмазів практично не робить впливу на висотні параметри шорсткості. У відомих роботах [5,10] показано, що максимальна глибина впровадження алмазних зерен залежить від концентрації алмазів. При зменшенні концентрації знижується кількість алмазних зерен, що беруть участь в різанні, і при постійному тиску брусків на деталь сила, що діє на одне окремо узятє зерно, зростає. При цьому унаслідок збільшення глибини впровадження зерна в оброблюваний матеріал слід чекати підвищення шорсткості. Проте при великому числі проходів встановлюється однорідний рельєф поверхні, характерний для даної зернистості, тому вищесказане справедливо лише у тому випадку, коли тривалість хонінгування достатньо мала і на поверхні циліндрів не встигає сформуватися що встановив ця мікропрофіль. Збільшення кута сітки хонінгування також не робить впливу на висотні параметри шорсткості.

Залежність висотних параметрів шорсткості в залежності від часу алмазного хонінгування представлена на рис. 3.3.

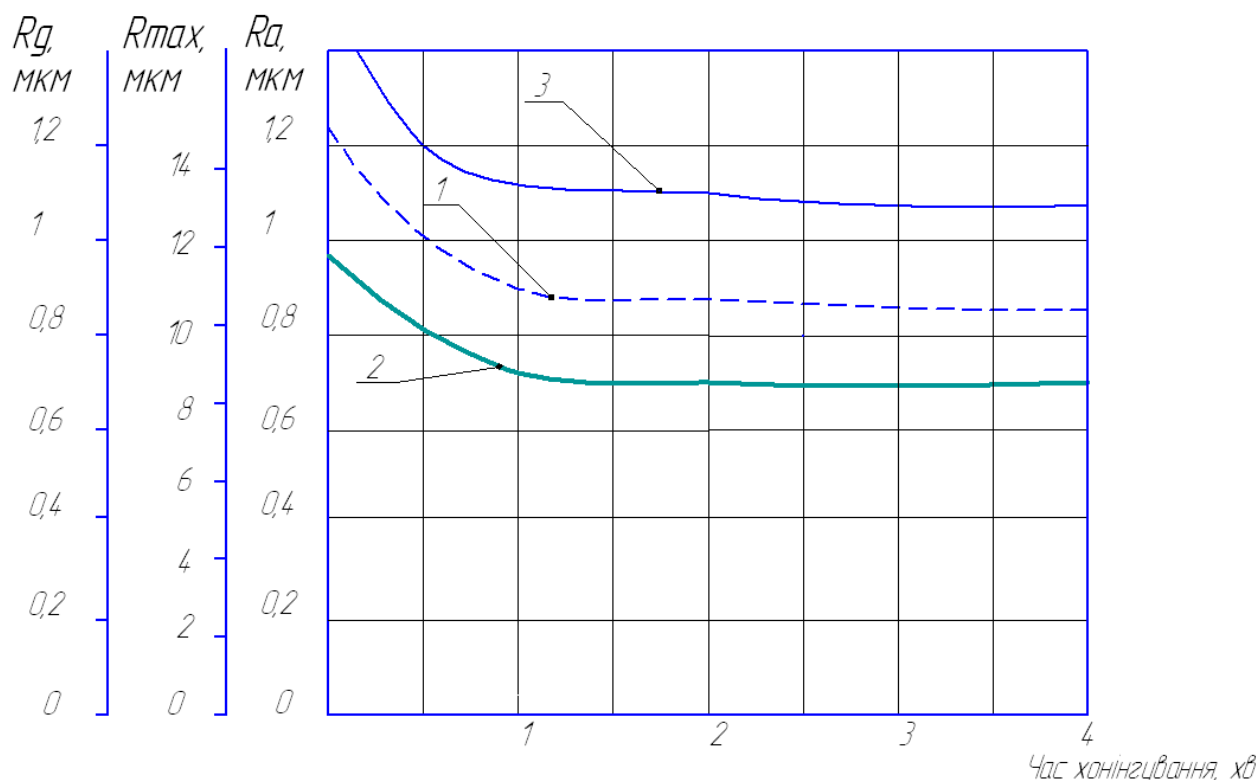


Рисунок 3.3 - Залежність висотних параметрів шорсткості від часу хонінгування

В процесі хонінгування в початковий період відбувається інтенсивне зняття мікронерівностей початкової шорсткості поверхні оброблюваної деталі, далі вона поступово знижується і утворюється нова шорсткість, характерна для даних умов обробки. Тривалість цього процесу визначається багатьма чинниками, в першу чергу, зернистістю брусків.

Проведені дослідження впливу зернистості алмазних брусків, концентрації алмазів, кута сітки і часу хонінгування на параметри шорсткості, пов'язані з нерівностями у напрямі довжини профілю. Залежність даних параметрів шорсткості від зернистості алмазних брусків приведена на рис. 3.4.

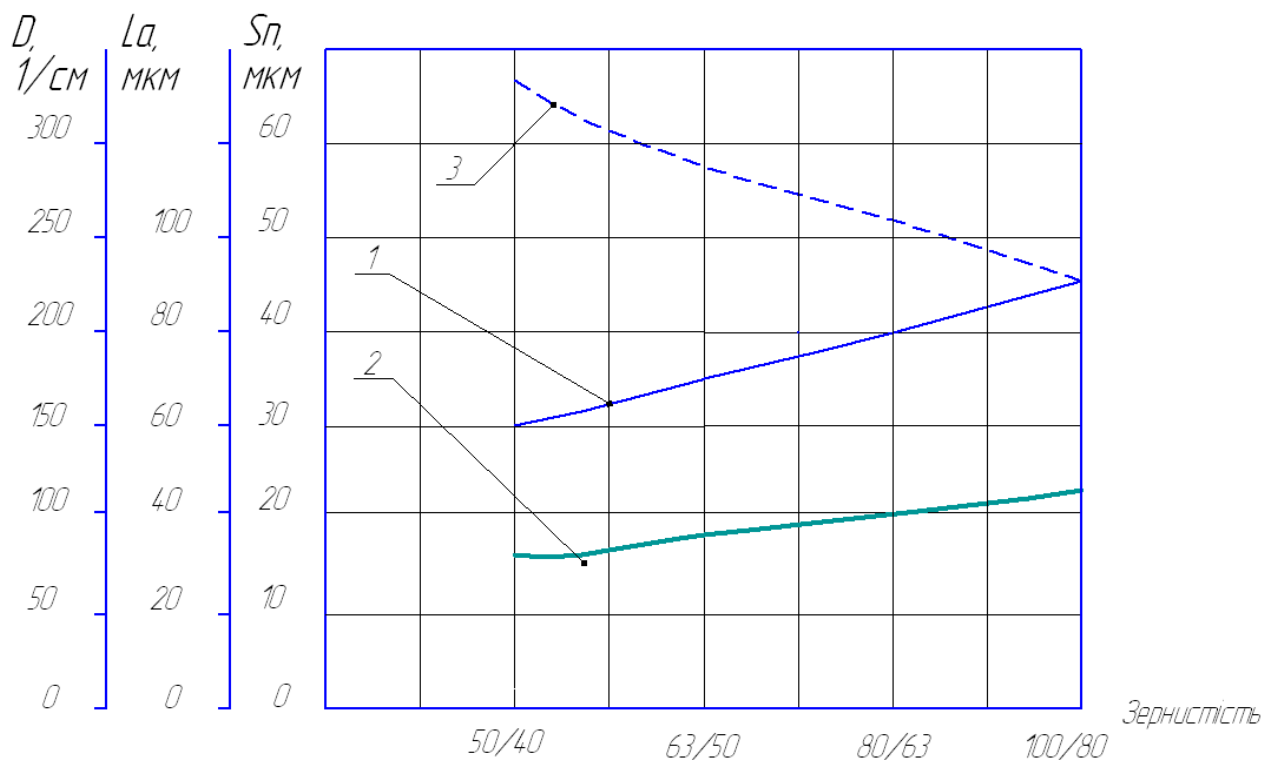


Рисунок 3.4 - Залежність параметрів шорсткості поверхні, пов'язаних з властивостями нерівностей в напрямку довжини профілю, від зернистості алмазних брусків: 1 - середній крок нерівностей S_n , 2 - середня довжина хвилі профілю L_a , 3 - щільність виступів профілю D

Встановлено, що середній крок нерівностей і середня довжина хвилі профілю із збільшенням зернистості зростають, а щільність виступів профілю знижується. Зменшення щільності виступів можна пояснити збільшенням середнього кроку нерівностей профілю, який вимірюється в межах базової довжини. Щільність виступів визначається числом виступів профілю на одиницю довжини [3]: $D = \frac{1}{S_n}$ -, отже, чим більше S_n , тим менше D . Концентрація алмазів не робить істотного впливу на параметри шорсткості, пов'язані з властивостями нерівностей у напрямі довжини профілю, як і на висотні параметри.

Збільшення кута сітки приводить до деякого зростання середнього кроку нерівностей профілю, і, отже, знижує щільність виступів профілю D . Це можна пояснити тим, що із збільшенням кута сітки хонінгування розмір

діагоналі ромба, що утворюється слідами ріжучих зерен, у напрямі осі циліндра (і у напрямі вимірювання шорсткості) збільшується.

Час хонінгування не робить впливу на параметри шорсткості, пов'язані з властивостями нерівностей у напрямі довжини профілю, оскільки стала шорсткість при подальшому збільшенні тривалості хонінгування практично залишається постійною.

Експлуатаційні властивості деталей, що працюють в умовах тертя, істотно залежать від форми мікрорельєфу поверхні. Тому відносна опорна довжина профілю є вельми важливою характеристикою мікропрофілю, оскільки дозволяє побічно оцінити здатність поверхні, що несе, і її зносостійкість. .

Аналіз опорних кривих хонінгувальних поверхонь алмазними брусками різної зернистості показує, що зміна зернистості практично не впливає на опорну довжину профілю. Концентрації алмазів, кут сітки і час хонінгування також не роблять істотного впливу на величину відносної опорної довжини профілю хонінгувальних поверхонь.

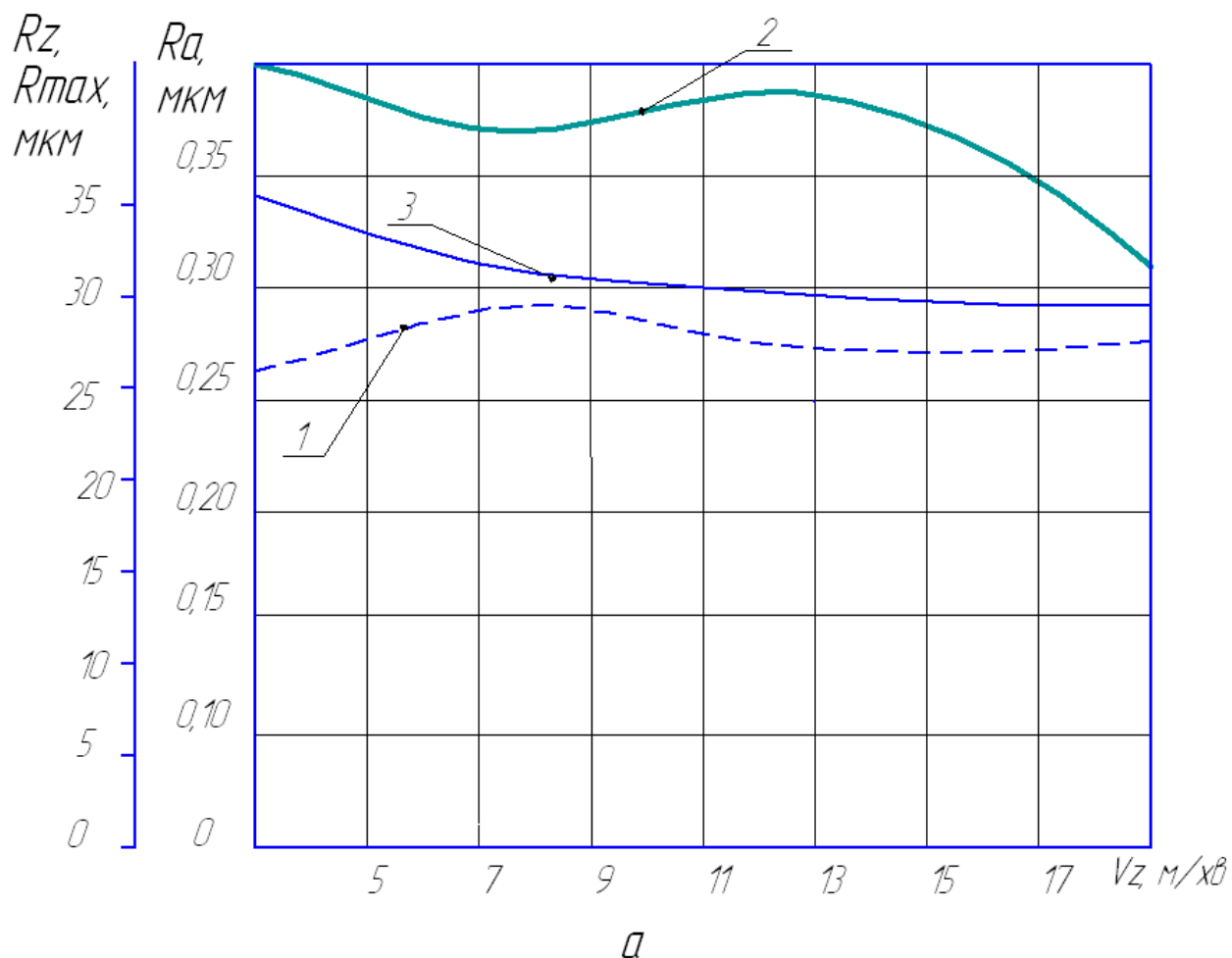
Збільшення швидкості обертання хонінгуювальної головки (рис.3.5.б) веде до підвищення інтенсивності обробки і як наслідок до невеликого зниження висотного параметра шорсткості R_{max} , параметри шорсткості R_z і R_a практично не змінюються.

На параметри шорсткості, пов'язані з властивостями нерівностей у напрямі довжини профілю, кут сітки помітного впливу не надає (рис.3.5 а).

Із збільшенням швидкості обертання хонінгуювальної головки середній крок нерівностей профілю S_m зменшується, а щільність виступів профілю D збільшується (рис.2.9 б).

Відносна опорна довжина профілю із збільшенням швидкості поворотно - поступальної ходи змінюється трохи (рис. 3.5а), кращі показники спостерігаються при швидкості $V_2 = 13,6$ м/хв (кут сітки рівний 50°).

Відносна опорна довжина профілю із збільшенням швидкості обертання хонінгувальної головки збільшується, проте при збільшенні швидкості вище 45,53 м/хв ($n = 250$ об/хв) зменшується (рис. 3.5 б). Це пояснюється тим, що із збільшенням частоти обертання головки підвищується інтенсивність обробки. При частоті $n = 160$ об/хв відносна опорна довжина не встигає досягти максимальних значень за час 60 с., а при $n = 400$ об/хв початковий профіль поверхні отвору повністю знімається і значення відносної опорної довжини знижуються.



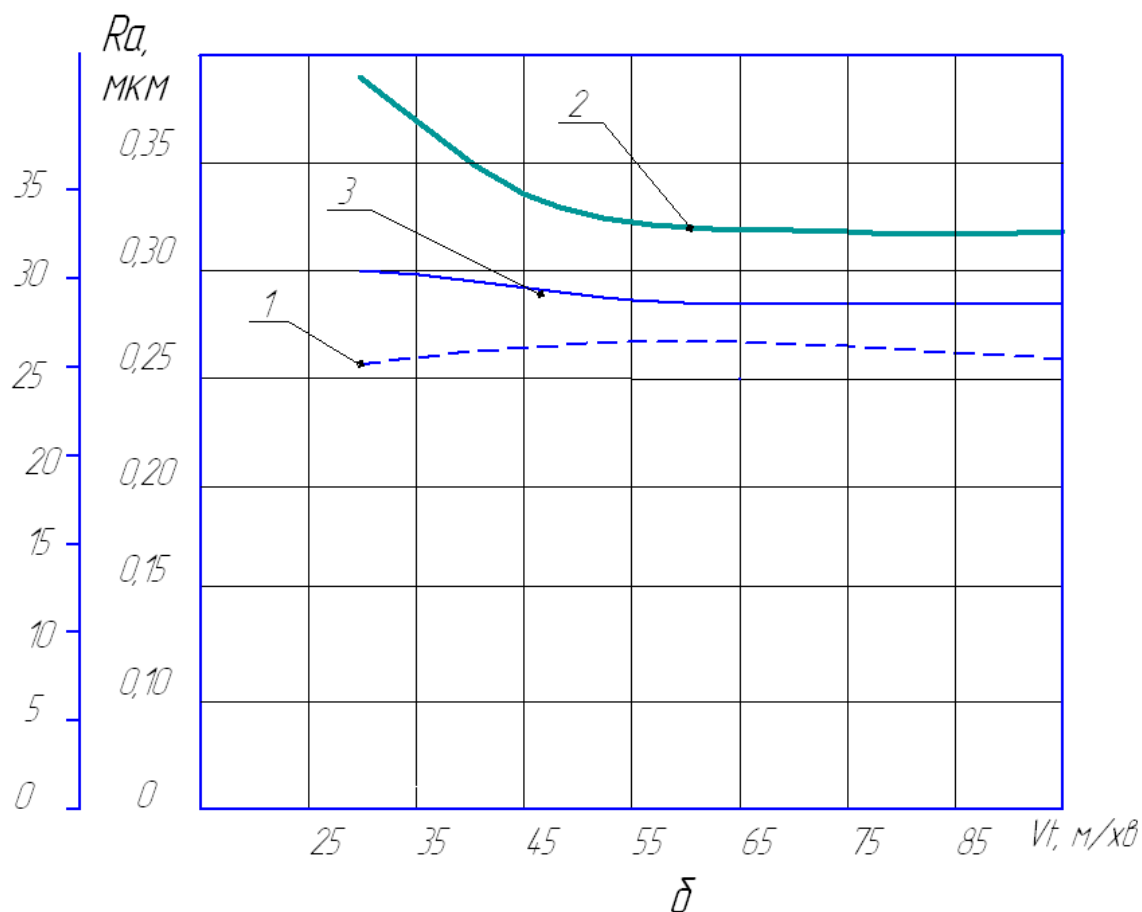


Рисунок 3.5 - Залежність параметрів шорсткості поверхні: а - від швидкості зворотно - поступального руху хонінгувальної головки, б - від швидкості обертання хонінгувальної головки: 1 - середньо арифметичне відхилення профілю $Ra, \mu\text{m}$; 2 - найбільша висота нерівностей профілю $R_{\text{max}}, \mu\text{m}$; 3 - висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини) $R_z, \mu\text{m}$

Таким чином, приходимо до висновку, що найбільша відносна довжина опорної поверхні досягається при швидкості зворотно поступального руху - 13,4 м/хв, швидкості обертального руху - 45,53 м/хв час обробки $t = 60$ с.

3.2. Дослідження мікропрофілю оброблених поверхонь

Мікропрофіль поверхні оцінювали шорсткістю всієї поверхні Ra , шорсткістю поверхні між масляними кишнями R'_z (по профілограмам), відносною опорною величиною профілю tr на різних рівнях і висотою

(завглибшки) масляних кишень (рисок), середньою шириною рисок (по профілограмам). На малюнку приведені основні характеристики мікропрофілю зразків, оброблених при попередньому хонінгуванні брусками АСБ 125/100 МК2 100 % і остаточному хонінгуванні брусками АСР 80/63 Р11/р9 50, АСМ 28/20 МКЗ 100 % і на зв'язці МА. Найбільш оптимальний профіль виходить після обробки спеціальними брусками МА протягом 15 с. Бруски на еластичній зв'язці Р11/р9 вимагають великих витрат часу для отримання необхідної опорної поверхні, при цьому спостерігається розвал кромки рисок, ширина рисок збільшується. Бруски на зв'язці МКЗ дають значну шорсткість на ділянках між ризиками, а глибина їх значно менше (чим після обробки брусками на зв'язці МА) унаслідок високої ріжучої здатності цих брусків.

Подальші дослідження процесу плосковершинного хонінгування були проведені на гільзах циліндрів двигуна ЯМЗ-236. Попереднє хонінгування проводили брусками АСБ 125/100 МК2 100 %. На операції остаточного хонінгування використовували спеціальні бруски МА. Застосовувалася хонінгувальна головка з розмірами брусків АБХ 125Х8Х13Х6 і механічне пристосування для кріплення гільз.

Рідина, для охолодження, — суміш з 85 % гасу і 15 % масла «Індустріальне-20». Режим обробки: окружна швидкість — 45 м/хв, швидкість зворотно—поступального руху — 8 м/хв, тиск — 0,3 МПа, час — 10..30 с.

Мікропрофіль поверхні ГЦ, оброблених алмазним хонінгуванням приведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Мікропрофіль гільз циліндрів

Час, с	t _p		R _{max} мкм	Середні розміри масляних кишень, мкм		R _z мкм
	t _p =1 мкм	t _p =1,5 мкм		глибина	ширина	

10	32	54	11	6,8	76	1,5
15	40	70	9	6,0	70	1,0
20	50	77	7,5	5.0	60	0,5
30	54	80	7,5	4.1	40	0.4

Необхідний мікропрофіль поверхні гільзи циліндра виходить при часі обробки 20 с.

Для остаточного плосковершинного хонінгування рекомендуються хонінгувальні бруски, в яких антифрикційний наповнювач частково втирається в оброблену поверхню. Тому її зносостійкість і припрацювання представляють практичний інтерес.

Для аналізу впливу основних параметрів обробки хонінгуванням на параметри шорсткості поверхні циліндра виконувались дослідження по ГОСТ 2789 і міжнародному стандарту EN ISO 13565-2:1996 (німецькому національному стандарту DIN 4776) .

На відміну від серійних приладів контролю мікрогеометрії поверхні, що визначають висотні параметри R_a , R_z , R_q , R_{max} і крокові параметри S , S_m , ІВК «Профіль» відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 13565-2:1996 визначає додаткові характеристики профілю поверхні, – R_{pk} , R_k , R_{vk} . Дані параметри виходять з побудови опорної лінії поверхні (кривій Аббота) що характеризує процентний зміст матеріалу по висоті шорсткого шару в межах максимальної висоти мікронерівностей R_{max} . Будується ця крива на підставі математичної обробки профілограм поверхні. При цьому по осі абсцис відкладається відношення суми опорної довжини профілю до вибраної базової довжини вимірюваної ділянки (у наших експериментах рівної 2,5 мм). По осі ординат відкладається відстань відповідне вибраному рівню, де підсумовувалася опорна довжина профілю, віднесене до R_{max} . На рис.1 показана профілограма і крива Аббота умовної поверхні. На кривою Аббота проводиться прямолінійна лінія, ординати точок перетину якої з кривою опорної поверхні визначають шукані параметри шорсткості. Критерієм вибору

прямолінійної ділянки є найменше значення різниці ординат в межах кривій Аббота.

По кривою Аббота визначаються параметри, що пов'язані з процесом зношування і характеризують:

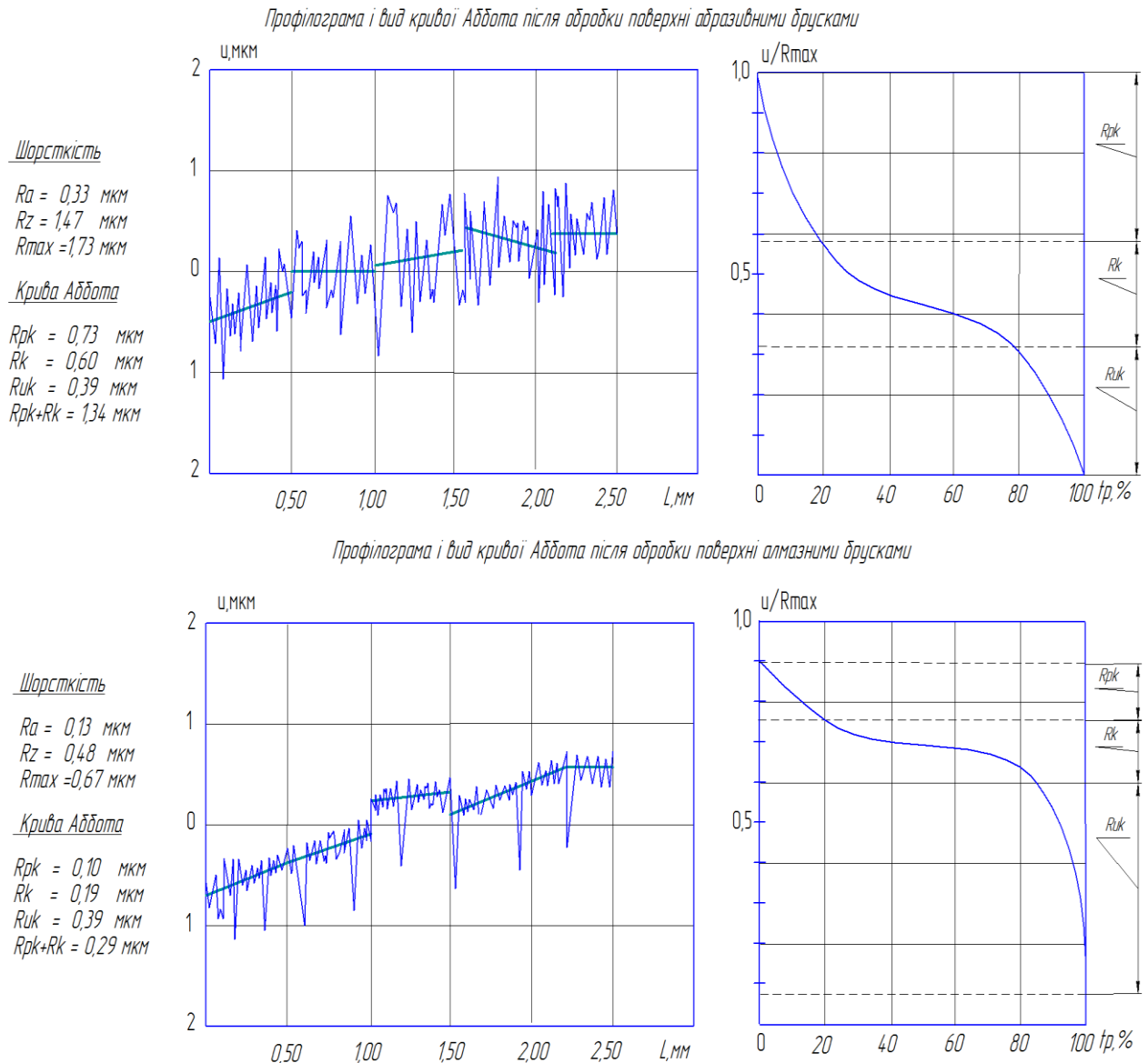


Рисунок 3.6. Профілограми і вид кривої Аббота оброблених поверхонь

Rpk – висоту виступів що швидко зношуються в перший період експлуатації;

Rk – основу профілю, яка тривалий час знаходиться в роботі і є площею, що несе, у міру спрацьовування зовнішніх шарів, а також що дозволяє оцінити величину зближень контактуючих деталей під навантаженням;

Rvk – глибину западин профілю і відповідно змашуючу здатність, з одного боку, а з іншої – що впливає на процеси втомного руйнування;

$Rpk + Rk$ – зношуваність робочих поверхонь.

Результати дослідження відображено на рис. 3.6

3.3. Порівняльні дослідження результатів хонінгування алмазними брусками на металевій та вулканітовій зв'язці

Дослідження проводилися на базових режимах різання: швидкість обертального руху хонінгувальної головки 286 м/хв, швидкість поступального руху 14 м/хв при постійному тиску брусків 054 МПа. Використовувалися бруски зернистістю 100/80 та 40/28.

У табл. 3.2 наведено значення висотних параметрів шорсткості залежно від вихідної шорсткості поверхні та часу хонінгування брусків на вулканітовій зв'язці різної зернистості.

Таблиця 3.2. Висотні параметри шорсткості поверхні циліндрів ДВЗ при хонінгуванні брусками на вулканітовій зв'язці

Час хонінгування, хв	Параметри шорсткості					
	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Ra , мкм	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Ra , мкм
	значення параметрів шорсткості при:					
	зернистості брусків 100/80			зернистості брусків 40/28		
	0,937	9,801	1,238	0,858	8,794	1,126
0,5	0,318	4,259	0,430	0,164	2,933	0,247
1,0	0,289	4,168	0,396	0,129	2,426	0,182
2,0	0,274	3,239	0,363	0,114	1,793	0,156
4,0	0,251	2,994	0,333	0,091	1,298	0,121

При хонінгуванні брусками на вулканітовій зв'язці вже після 30 секунд хонінгування відбувається значне і найбільше зниження всіх висотних параметрів шорсткості оброблюваної поверхні. Це можна пояснити тим, що мала товщина жорсткого алмазоносного шару не повною мірою забезпечують прилягання робочого профілю бруска до поверхні отвору, що обробляється, і з перших секунд хонінгування не вся поверхня брусків бере участь у роботі.

Алмазні зерна не можуть занурюватися в алмазоносний жорсткий шар. Відсутність занурення алмазних зерен у жорсткий алмазоносний шар під дією сил різання дозволяє обробляти поверхні з порівняно великою вихідною шорсткістю $Ra = 0,8 \dots 1,0$ мкм.

Зернистість алмазів брусків є одним із найбільш істотних факторів, що впливають на висотні параметри шорсткості. Бруски зернистістю АСМ 100/80 характеризуються найменшою глибиною впровадження алмазних зерен в оброблювану поверхню та забезпечують нижчу шорсткість.

Вплив часу хонінгування алмазних брусків на параметри шорсткості, пов'язаними з властивостями нерівностей у напрямку довжини профілю, наведено в табл. 3.2.

Зниження середнього кроку нерівностей і середньої довжини хвилі профілю Ra в початковий період хонінгування пояснюється тим, що не вся робоча поверхня бруска знаходиться в контакті з поверхнею отвору, що обробляється, і не всі алмазні зерна брусків беруть участь у різанні. Після 30 секунд хонінгування процес стабілізується, автоматично підтримується постійна глибина впровадження алмазних зерен в оброблювану поверхню, і практично величини Ra не змінюються.

Найбільша інтенсивність зниження вихідної шорсткості та збільшення відносної опорної довжини профілю спостерігається у перші 30 секунд хонінгування.

Хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці дозволяє технологічно забезпечувати задану величину відносної опорної довжини профілю. З цією метою проведено дослідження впливу часу хонінгування на величину t_p при хонінгуванні алмазними брусками на вулканітовій зв'язці різної зернистості (табл. 3.3; 3.4 і рис. 3.7; 3.8).

Таблиця 3.3. Залежність відносної опорної довжини профілю від часу хонінгування

Рівень	Відносна опорна довжина профілю t_p , %
--------	---

	Вихідна величина t_p %	Час хонінгування, хв			
		0,5	1	2	4
0	0	0	0	0	0
10	0,5125	0,381	0,219	0,376	0,466
20	2,164	3,244	0,889	2,764	3,046
30	8,193	15,830	6,0969	11,768	14,730
40	24,170	44,079	28,249	39,062	39,678
50	51,791	73,400	65,922	70,598	69,915
60	77,708	92,101	87,591	89,701	89,807
70	92,533	97,642	96,878	96,835	97,031
80	97,859	99,264	99,107	99,120	99,187
90	99,355	99,786	99,742	99,791	99,769
100	100	100	100	100	100

Примітка. Зернистість брусками на вулканітовій зв'язці 100/80

Таблиця 3.4. Залежність відносної опорної довжини профілю від часу хонінгування

Рівень	Відносна опорна довжина профілю t_p %				
	Вихідна	Час хонінгування, хв			
		0, 5	1	2	4
0	0	0	0	0	0
10	0,373	0,282	0,348	0,187	0,206
20	1,416	3,445	6,028	1,0512	1,114
30	5,168	27,748	27,787	8,318	6,718
40	17,671	54,663	51,151	29,952	29,866
50	43,265	75,728	75,728	55,454	67,534
60	70,920	90,358	93,719	79,302	90,794
70	88,869	97,572	98,944	95,252	97,982
80	96,514	99,363	99,666	99,200	99,528
90	99,044	99,776	99,871	99,823	99,871
100	100	100	100	100	100

Примітка. Зернистість брусками на вулканітовій зв'язці 40/28

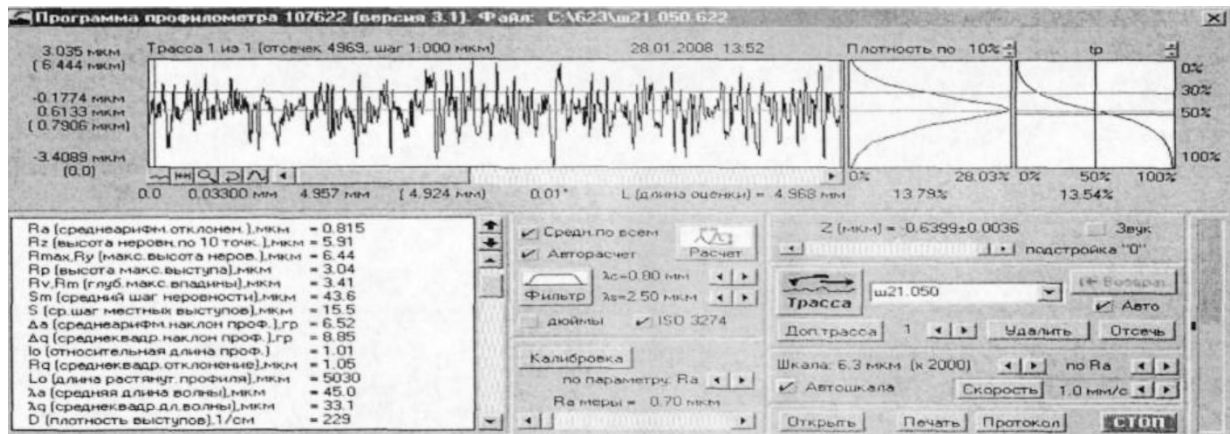
Зернистість алмазів брусків на вулканітовій зв'язці істотно впливає на формування мікропрофілю поверхні. З розгляду відносних опорних кривих профілю видно, що брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 100/80 забезпечують відносну опорну поверхню=14,730...39,677 % при рівні перерізу профілю 30...40 %, брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 40/28 забезпечують t_p - 6,718 ... 29,866% при тому ж рівні перерізу (час хонінгування склав 4 хв).

При більшій зернистості глибина впровадження алмазних зерен в

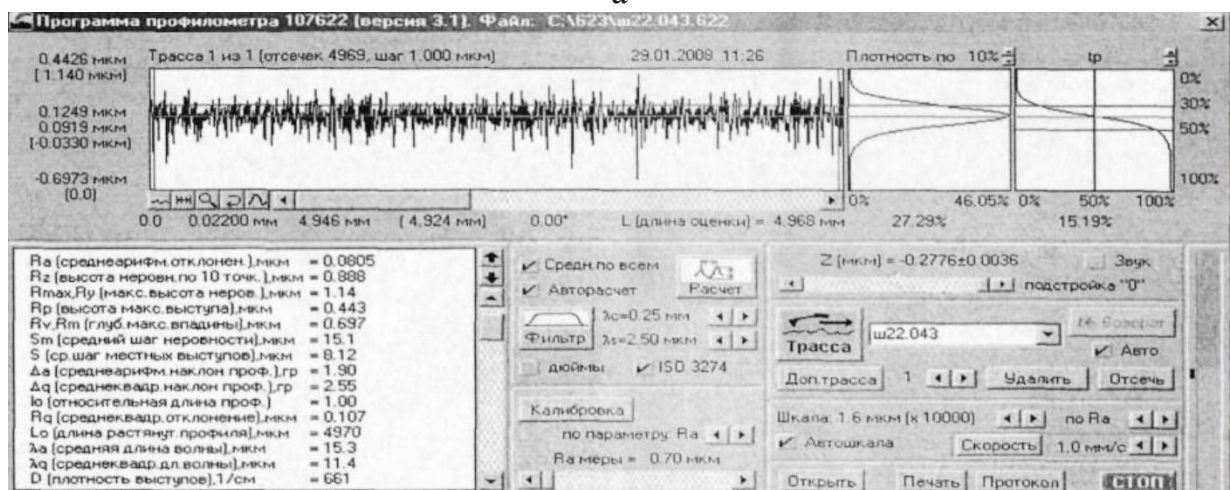
поверхню, що обробляється, буде більшою і на майданчиках опорної поверхні з'являється додаткова шорсткість, яка істотно знизить відносну опорну довжину профілю. Утворюється нова з більшою відносною опорною довжиною профілю шорсткість, і повністю видаляється вихідна шорсткість.

Алмазні зерна брусків малої зернистості будуть впроваджуватися в поверхню, що обробляється, на меншу глибину, тому вони будуть незначно знижувати вихідну шорсткість, і відносна опорна довжина профілю також мала.

Профілограмами поверхонь вихідних та оброблених брусків брусками на вулканітовій зв'язці протягом різного часу представлені на рис. 3.7.



а



б

Рисунок 3.7. Параметры мікропрофілю поверхні, обробленої попередньо брусками на металевій зв'язці (а) і брусків брусками на вулканітовій зв'язці після 4 хвилин хонінгування (б)

Значення параметрів шорсткості Ra та Rmax, отримані в результаті

хонінгування брусками на металевій та брусками на вулканітовій зв'язці, а також оброблених за технологією підприємства, представлені на рис. 3.8. Аналіз діаграм показує, що брусками на вулканітовій зв'язці забезпечують найменшу шорсткість обробленої поверхні.

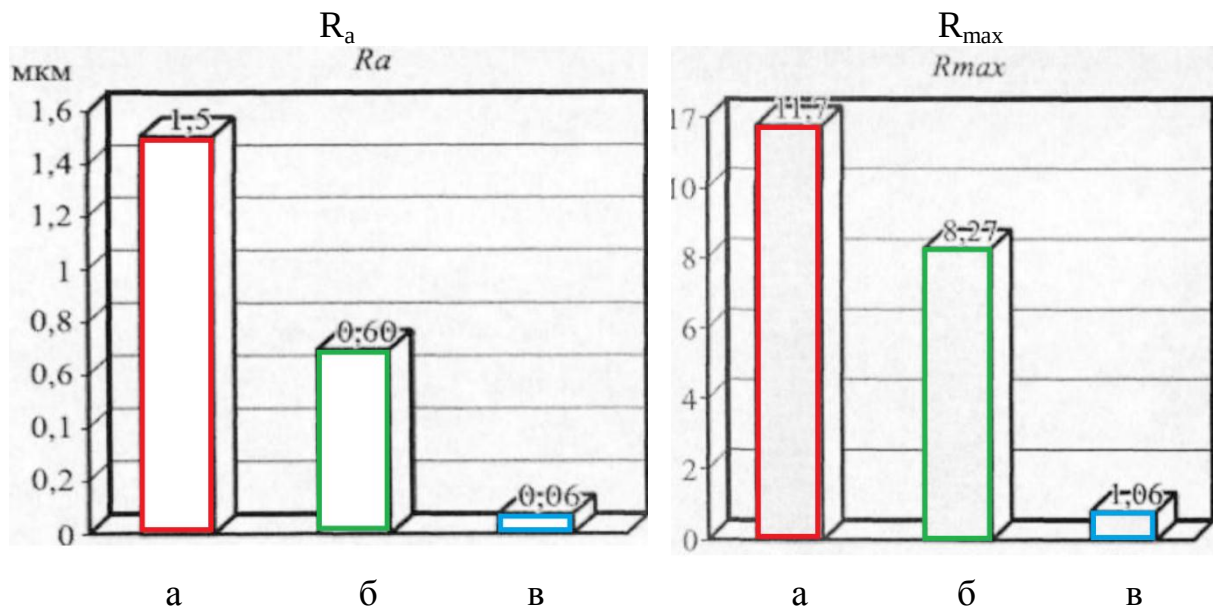
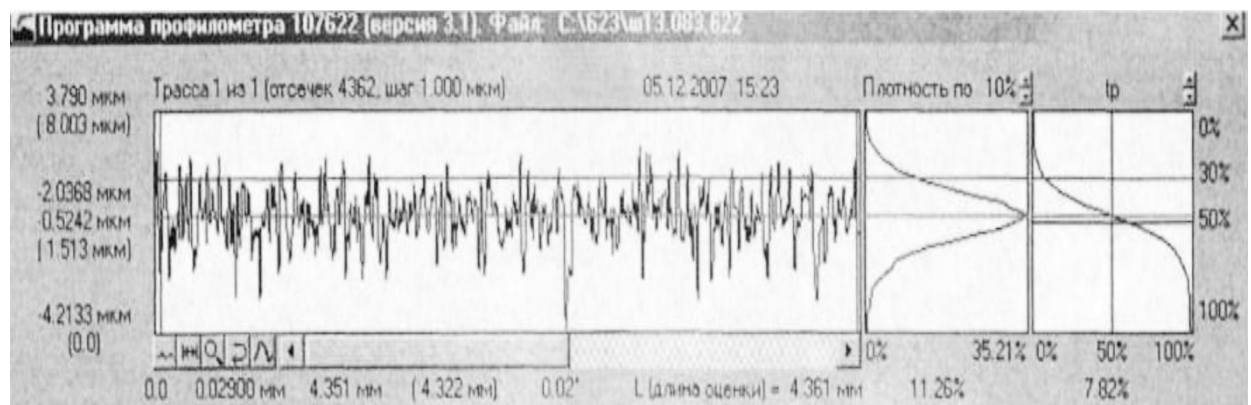
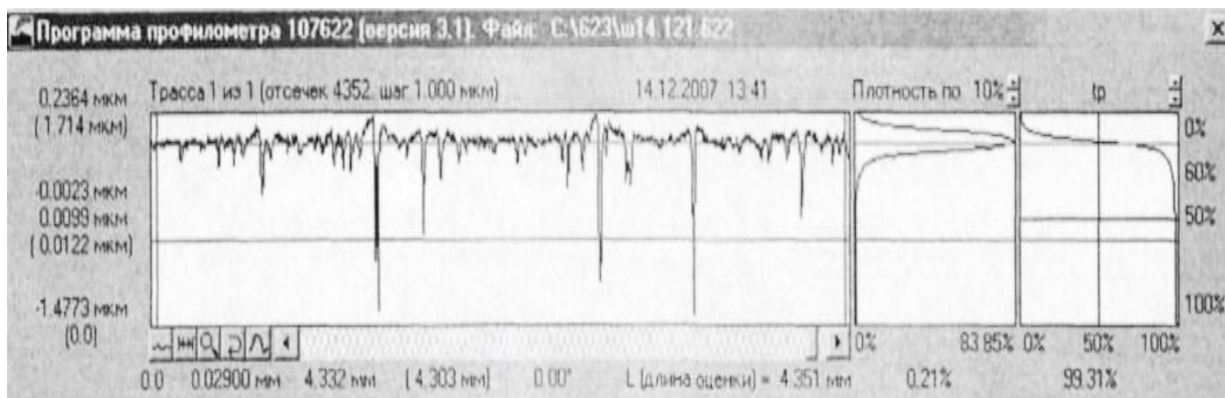


Рисунок 3.8. Діаграми параметрів шорсткості R_a і R_{max} на поверхні циліндра, обробленого за технологією підприємства а) та зразків, оброблених алмазними брусками на металевій (б) та брусками на вулканітовій зв'язці (в)

На рис. 3.9 наведені профілограми поверхонь після хонінгування брусками на металевій та брусками на вулканітовій зв'язках.



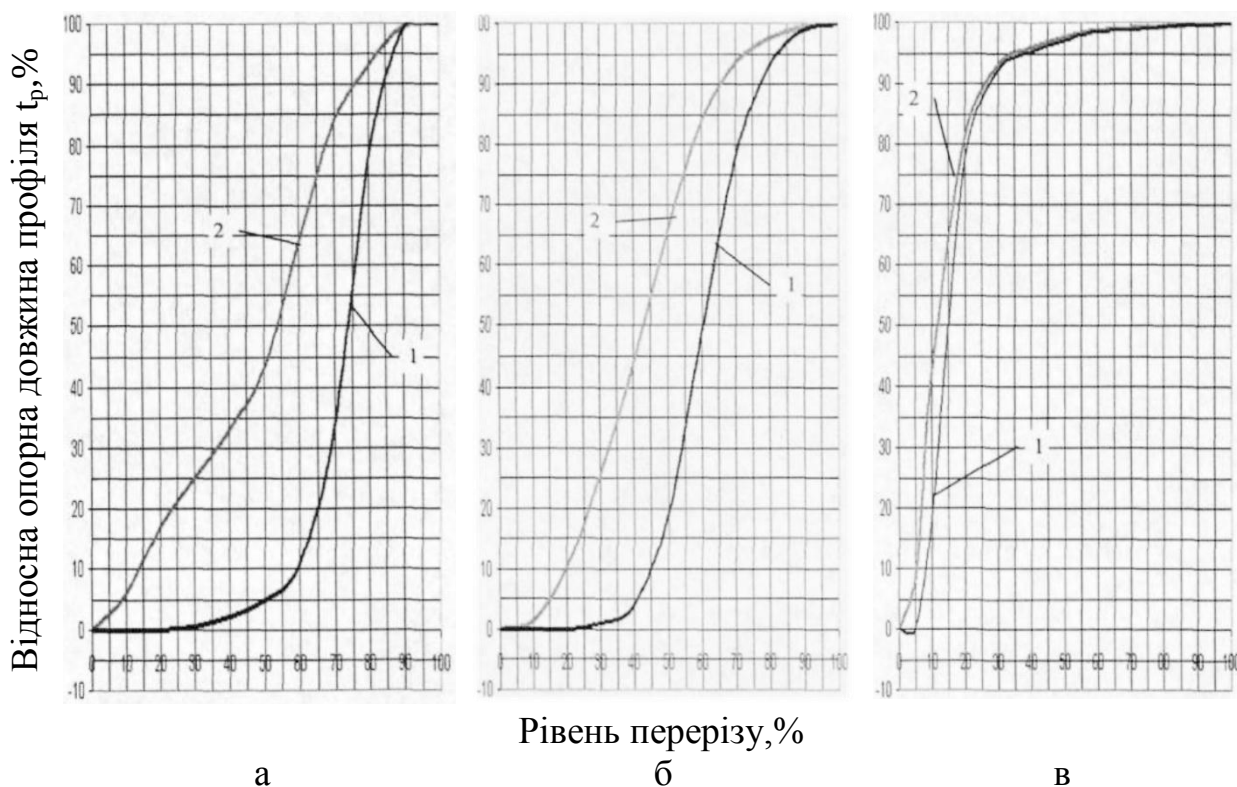
а



б

Рисунок 3.9. Профілограми поверхні циліндрів: а- хонінгованих брусками на метал зв'язці; б - хонінгованих брусками на вулканітовій зв'язці

На рис.3.10 показано зміну величини відносної опорної довжини профілю поверхні циліндрів, оброблених брусками на металевій, брусками на вулканітовій зв'язці та за технологією підприємства (рис. 3.10, крива 1) у процесі зношування їх поверхонь у парі циліндр - поршень (рис. 3.10, крива 2).



а

б

в

Рисунок 3.10. Відносна опорна довжина профілю поверхні циліндрів, оброблених: а - за технологією підприємства; б - брусками на металевій зв'язці; в – брусками на вулканітовій зв'язки

Хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці дозволяє технологічно забезпечувати величину відносної опорної довжини профілю 95...97 % при рівні перерізу 30 ...40%, що значно більше за величину відносної опорної довжини профілю поверхні після хонінгування брусками на металевій зв'язці при тому ж рівні перерізу. Як видно з наведених залежностей, така поверхня практично не змінюється після проведених експериментів щодо визначення зносу поверхні циліндрів.

Спочатку знос протікає більш інтенсивно, а потім стабілізується, при цьому для поверхні, обробленої брусками зернистістю 50/40, час зносу становить меншу величину.

Діаграми величини зносу поверхні циліндрів, оброблених за технологією підприємства та зразків, оброблених брусками на металевій та брусками на вулканітовій зв'язці представлені на рис. 3.11. Великі значення відносної опорної довжини профілю у поєднанні з малою величиною шорсткості після хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці визначають зрештою значно менший знос поверхні пари циліндр - поршень (рис.3.11).

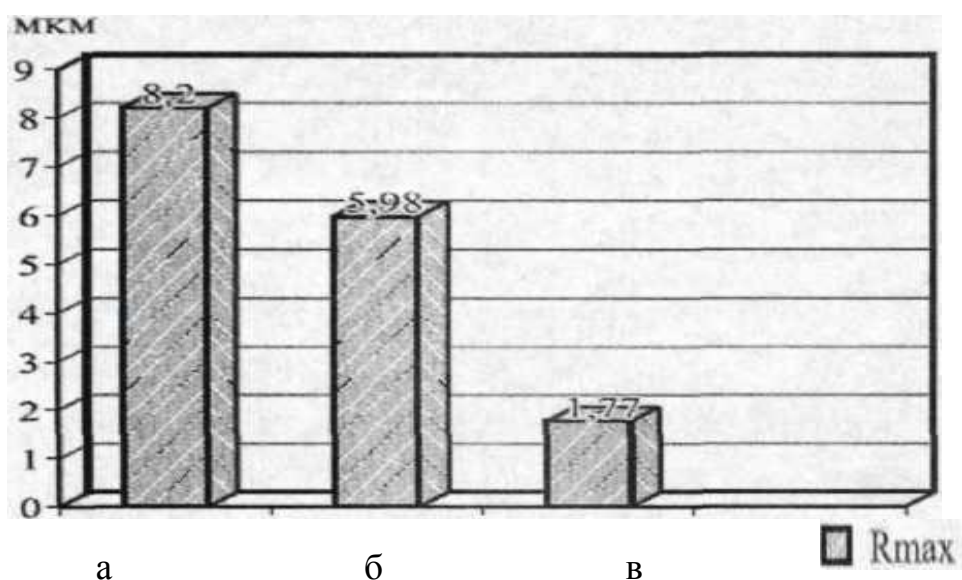


Рисунок 3.11. Діаграми величини зносу поверхні циліндрів, оброблених за технологією підприємства а) та зразків, оброблених брусками на металевій (б) та брусками на вулканітовій зв'язці (в)

Це підтверджується видом профілограм поверхонь циліндрів,

оброблених брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 28/20 (рис. 3.12), порівняно з профілограм поверхонь, оброблених брусками на металевій зв'язці зернистістю 100/80 (рис. 3.13).

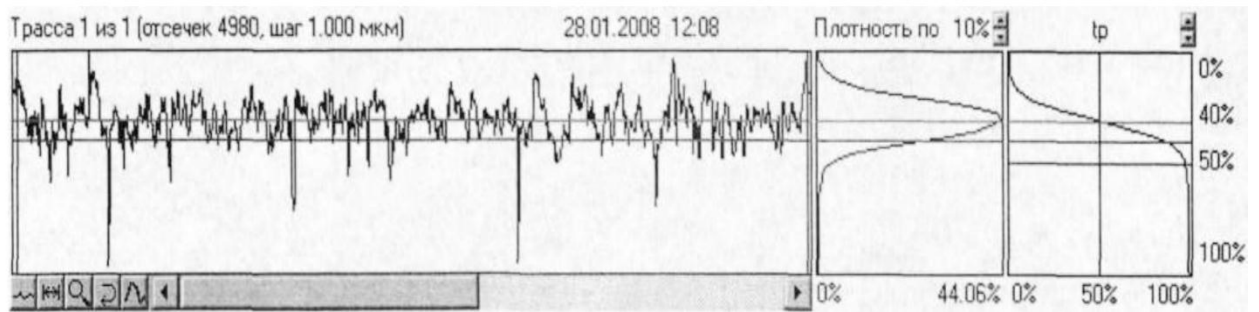


Рисунок 3.12. Профілограма поверхні циліндра, обробленого брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 28/20, до експерименту на знос

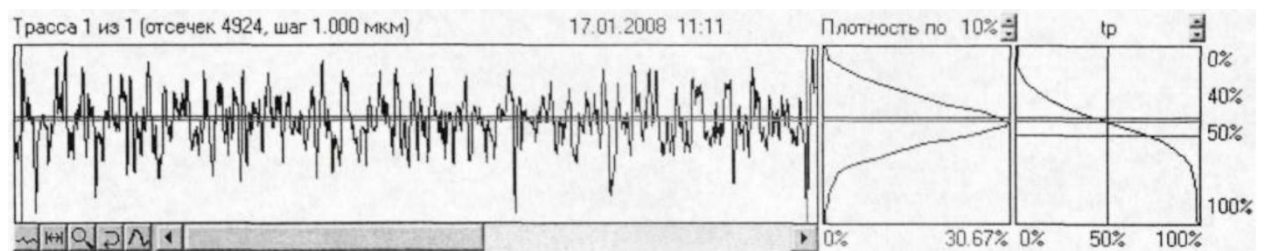


Рисунок 3.13. Профілограма поверхні циліндра, обробленого брусками на металевій зв'язці зернистістю 100/80, до експерименту на знос

Аналіз профілограм (рис. 3.14 і 3.15), отриманих після проведення випробувань на зношування, показує, що поверхні, оброблені брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 28/20, мають досить велику величину відносної опорної довжини профілю і відносно малу висоту мікронерівностей, мають більшу висоту мікронерівностей.

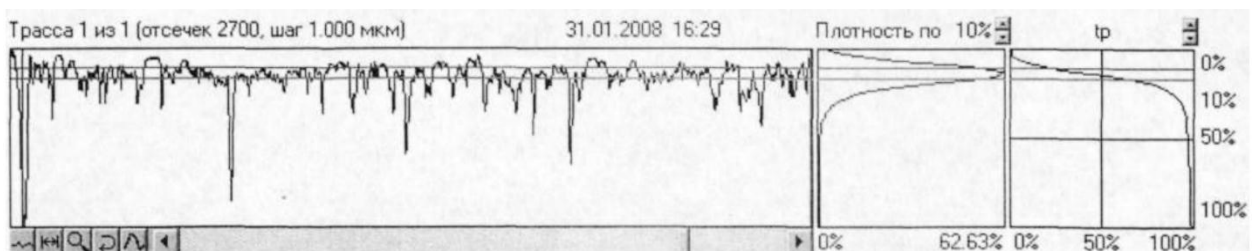


Рисунок 3.14. Профілограма поверхні циліндра, обробленого брусками на вулканітовій зв'язці зернистістю 28/20, після експерименту на знос

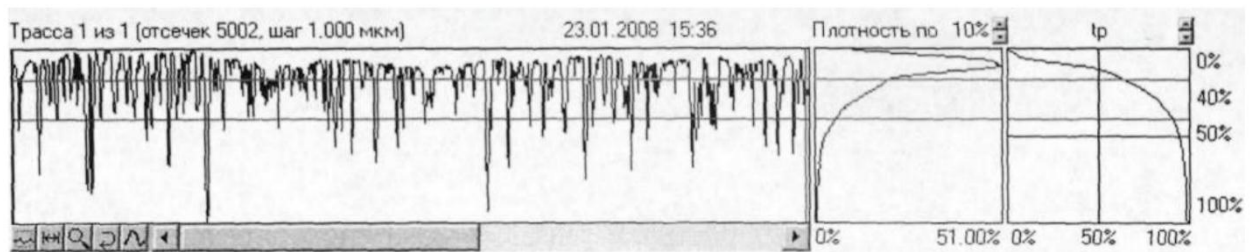


Рисунок 3.15. Профілограма поверхні циліндра, обробленого брусками на металевій зв'язці зернистістю 100/80, після експерименту на знос

3.4. Дослідження критеріїв якості та дефекти регулярного мікрорельєфу при хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці

До обробленої поверхні дзеркала циліндра блоку ДВЗ (рис. 3.16.) відповідно до функціонального призначення пред'являється ряд технологічних вимог [11][12]:

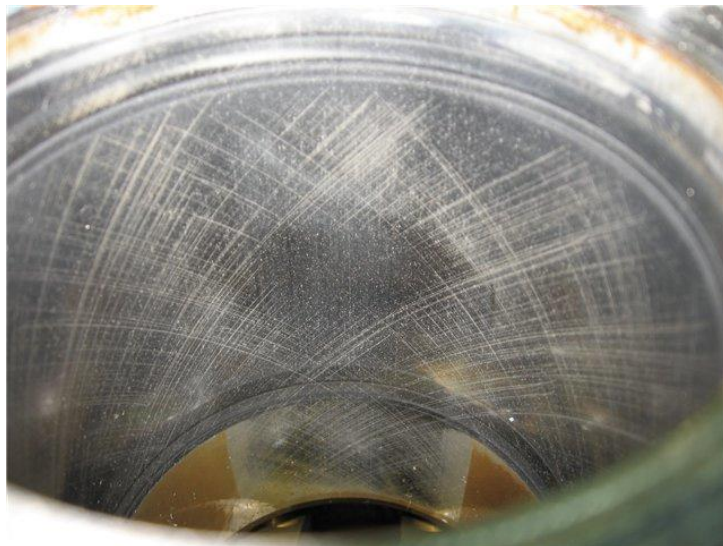


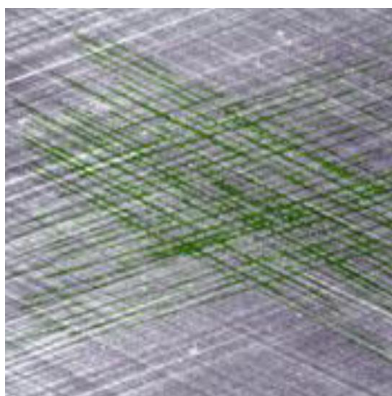
Рисунок 3.16. Рівномірність хонінгування

- для поверхні дзеркала циліндра допуск циліндричності 1 мкм, хвилястість менше 0,2 мкм, нециліндричність і непрямолінійність утворюючої менше 2—5 мкм, дотримання кута хонінгування 40° - 80°

- відсутність дефектного шару металу (структурно-фазових змін, напруги розтягування, мікротріщин),

- певні значення параметрів форми мікронерівностей і опорної поверхні.

Все це надає вплив на всю подальшу роботу ДВЗ.



Збільшення 15:1



Збільшення 80:1

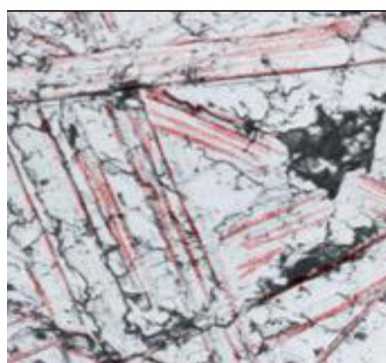
Рисунок 3.17. Оптимальний мікрорельєф поверхні гільз циліндрів

Зовнішній вигляд поверхні повинен бути виразним, однорідним, і чистим.

Дефект №1: Неоднаковий кут хонінгування, нерівна відстань між борозенками; матова зовнішня поверхня



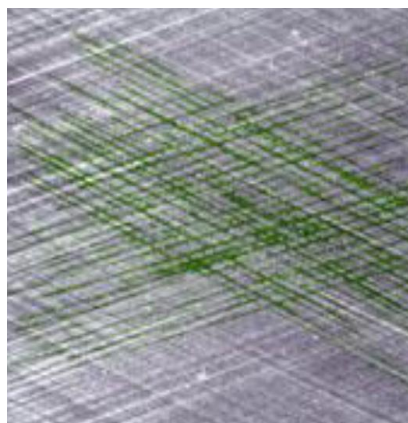
Збільшення 15:1



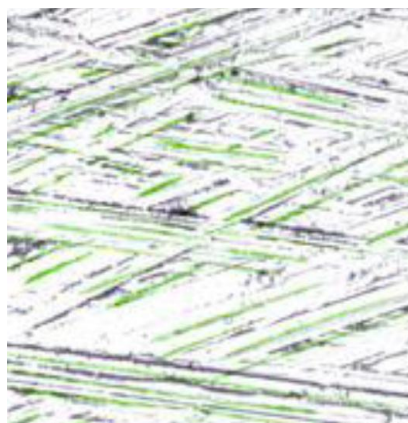
Збільшення 100:1

Рисунок 3.18. Нерівномірність кута хонінгування.

Можливі причини дефектів: невідповідний стан інструменту; недостатньо закріплена деталь; багатократне повторення процесу хонінгування різними брусками і з різною швидкістю.



Збільшення 15:1



Вигляд під похилим освітленням
Збільшення 80:1

Рисунок 3.19. Вигляд борозен при оптимальному процесі хонінгування

Наслідок виявлених дефектів: недостатній розподіл мастила, вібрація кілець, погане мащення, швидкий знос кілець.

Утворення борозен при процесі хонінгування. Краї борозен повинні бути чистими і чіткими, ширина борозен повинна бути однаковою, не дуже великою (максимум - 0,1 мм).

Дефект №2: Дуже густа або дуже рідка перехресна штрихова сітка; дуже тонкі або недостатньо глибокі, нечіткі борозенки.



Збільшення 15:1



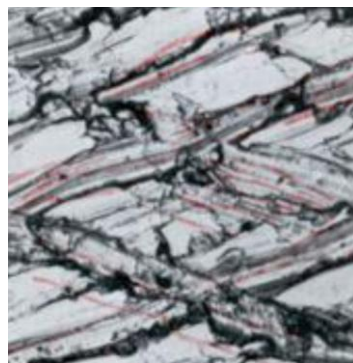
Збільшення 100:1

Рисунок 3.20. Дефекти вигляду борозен

Можливі причини дефектів: Недостатня товщина заготовки для хонінгування; тиск бруска дуже малий, утворюється низька зернистість поверхні; дуже жорстка зв'язка брусків.

Наслідок виявлених дефектів: Необхідна обкатка, кільця вібрують або зчіплюються, розподіл мастила недостатній, швидкий знос кілець і кільцевих виїмок, небезпека появи доріжок, схильність до стирання.

Дефекти: борозенки дуже широкі і хвилясті, що спричиняє за собою надмірне мащення, краї борозен заломлені і забруднені.



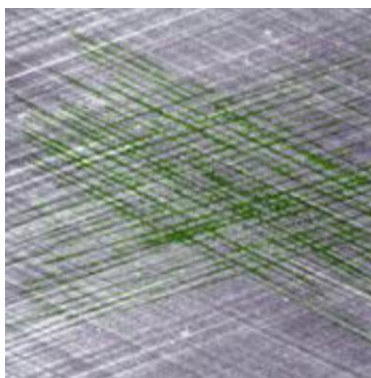
Збільшення 100:1

Рисунок 3.21. Вигляд поверхні з занадто широкими борознами

Можливі причини дефектів: хонінгувальний брусок з кубічними м'якими гранулами, які дуже швидко зношуються, відділяються, брусок затупляється, швидше тисне, чим ріже; мастило при цьому забруднюється.

Наслідки виявлених дефектів: швидкий абразивний знос робочої поверхні кілець і циліндра; погане мащення (невикористане масло витікає); велика перевитрата масла, схильність до появи доріжок і утворення корозії.

Орієнтація борозен при хонінгуванні. Рівномірна нарізка впродовж всього ходу бруска вгору і вниз.



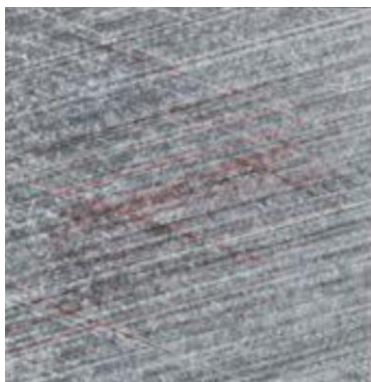
Збільшення 15:1



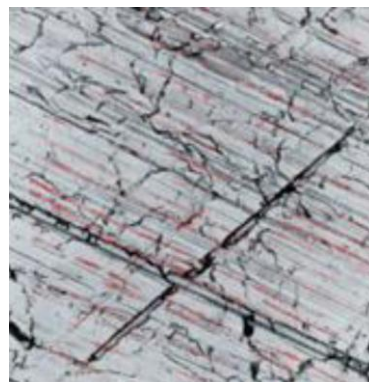
Збільшення 80:1

Рисунок 3.22. Оптимальний вигляд орієнтації борозен

Дефект №3: Відсутність ефекту перехресної сітки, нерівномірна відстань між борозенками.



Збільшення 15:1



Збільшення 100:1

Рисунок 3.23. Поверхня з дефектами орієнтації

Можливі причини дефектів: погана якість інструменту неправильне центрування бруска, зношеність з'єднань верстата, погано закріплена деталь, неоднаковий хід при неодноразовому хонінгуванні.

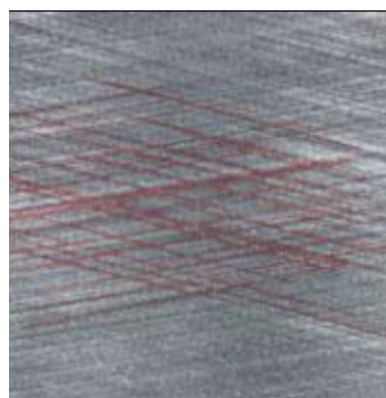
Наслідок виявлених дефектів: необхідна обкатка, недостатнє мащення, кільця дуже сильно обертаються, швидкий знос кілець і кільцевих виїмок, перевитрата масла.

Кут хонінгування. Дотримання кута хонінгування при обробці поверхні дзеркала циліндрів має дуже важливе значення для подальшої роботи ДВС. Відповідно до різних методик оцінки якості кут може варіюватися від 40 до 80 градусів.

Дефект №4: Дуже великий кут більш 60° (рис. 3.24.) виникає при неправильному співвідношенні між швидкістю поступальної ходи уздовж осі і кутовою швидкістю обертання, брусок рухається дуже швидко, шпиндель обертається дуже поволі, унаслідок чого буде потрібна тривала обкатку, через насосний ефект спостерігатиметься перевитрата масла тоді як здійснюватиметься погане мащення, на поршневих кільцях спостерігатиметься утворення доріжок. Дуже малий кут, менш 30° спостерігатиметься в тому разі якщо брусок рухається дуже поволі, а шпиндель обертається дуже швидко. (рис. 3.24). Внаслідок при роботі ДВЗ спостерігатиметься вібрація поршневих кілець, відповідно їх швидкий знос, знос їх посадочних місць, поганий розподіл масла і недостатнє мащення.



а) Збільшення 15:1



б) Збільшення 15:1

Рисунок 3.24. Вплив кута хонінгування на регулярний мікрорельєф: а) кут менше 30° б) кут більше 60°

3.5. Аналіз причин незадовільного стану мікрорельєфу оброблюваних поверхонь та розробка способів їх усунення

Налипання металу. При хонінгуванні алмазними брусками з малою зернистістю ризики можуть виникати в результаті налипання на робочу поверхню бруска частинок металу. Причини налипання металу – наявність на поверхні бруска ділянок без алмазів, тертя металевої зв'язки бруска об матеріал деталі, наросто утворення. У разі появи налипання необхідно вивести хонінгувальну головку з отвору і зачистити місця налипання металу на хоні абразивним бруском, після чого продовжити роботу на зниженому тиску.

Погрішності хонінгувальних головок. Причиною появи рисок може бути знос, недостатня жорсткість і точність виготовлення хонінгувальної головки. Найбільш небезпечним є вільне хитання колодок в пазах головки. Зважаючи на знос і погрішності виготовлення хонінгувальних головок не забезпечується рівномірний контакт брусків з оброблюваною поверхнею, що приводить до утворення задирів.

Площа контакту кожного хонінгувального бруска з оброблюваною деталлю повинна бути не менше 70%. Алмазні бруски на металевих зв'язках мало зношуються і не дозволяють компенсувати погрішності хонінгувальних головок. Усунути вплив на формування шорсткості поверхні налипання металу і частково – погрішностей хонінгувальних головок дозволяє застосування для остаточного хонінгування алмазних брусків на органічній зв'язці брусків. При використанні таких брусків відбувається самозаточування і прироблення хону, збільшується площа контакту хонінгувальних брусків з отвором, що дозволяє досягти шорсткості до $Ra = 0,8 - 0,2$ мкм. Забруднення ЗОР. При необхідності досягнення шорсткості $Ra = 0,4 - 0,2$ мкм ступінь забруднення ЗОР не повинен перевищувати 0,032% розмірів механічних частинок не повинні перевищувати 10 мкм.

Наявність в деталі стружки після попередніх операцій. Деталь до початку хонінгування необхідно очистити від механічних забруднень. Обов'язково контролювати на наявність стружки деталі з канавками в

отворах. Наявність на робочих поверхнях брусків сколовши, викришувань, гострих кромек, задирів. До початку роботи на брусках необхідно знімати фаски $1 \times 45^\circ$. Робота зношеними брусками, утворення надирів в результаті тертя корпусу колодок об деталь.

3.6. Дослідження досягнення зниження часу прироблення відновленого спряження та підвищення його зносостійкості

Встановлено, що при контактному тиску 1 МПа зразок з плосковершинним профілем зберігає свій профіль після 80 ч випробувань. Тому, щоб прискорити випробування, контактний тиск був збільшений до 2 МПа, що в 2—3 рази перевищує тиск поршневих кілець на гільзу циліндра.

Плосковершинний профіль поверхні зберігається до 60 год випробувань, а після залишаються окремі, рідкісні риси завглибшки до 2...3 мкм. При повному виведенні рисок знос поверхні стабілізується і буде такою ж, як і у звичайної поверхні. При цьому знос зразків з плато вершинним профілем стабілізується після 10 год, а із звичайним — після 17...18 год, тобто припрацювання зразків поліпшується в 1,7—1,8 рази.

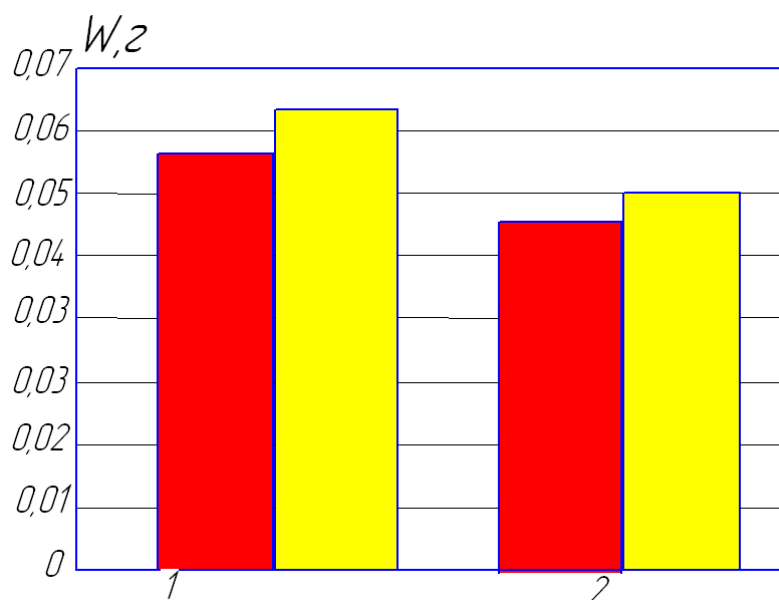


Рисунок 3.25. Знос зразків та контртіл в умовах граничного тертя: 1 - обробка алмазними брусками на металевій зв'язці; 2 - обробка алмазними брусками на вулканітовій зв'язці. ■ Контртіло ■ Зразок

Таким чином, знос поверхні зразків після плосковершинного хонінгування після закінчення 4000 год. роботи буде приблизно на 15 % менше, ніж після звичайного алмазного хонінгування, а повний ресурс зразків з плосковершинним профілем буде на 12,6 % більше, ніж із звичайним.

Дослідження процесу припрацювання гільз. Візуальний огляд гільз, поршнів і поршневих кілець такого двигуна після обкатки показав, що робочі поверхні їх чисті, без слідів захоплювання і задирів. Вимірювання шорсткості робочої поверхні гільз до і після обкатки в зоні нірезистової вставки показали, що початкова плосковершинна шорсткість її в процесі обкатки не ліквідується, а відбувається процес подальшого збільшення опорних майданчиків за рахунок зменшення шорсткості між рисками. При цьому на поверхні гільзи зберігаються риси (масляні кишені).

Для визначення величини зносу і характеристик шорсткості поверхні гільз був знятий з експлуатації і розібраний двигун ЯМЗ-236, у якого 3 гільзи мали плосковершинний профіль і 3 — звичайний. Пробіг автомобіля склав 23 450 км.

У гільз з плосковершинним профілем риси (масляні кишені) збереглися майже на всій поверхні, а знос їх був на 34 % менше.

На підставі лабораторних, стендових і експлуатаційних випробувань нами рекомендуються для гільз циліндрів з сірого чавуну (НВ 170-241) наступні оптимальні характеристики мікропрофілю: відносна опорна довжина профілю t_p — 55-75 % на рівні перетину профілю $t_p = 1,2-1,6$ мкм, середня глибина рисок — 2,1-5,2 мкм., ширина рисок — 25-65 мкм, шорсткість поверхні плато між рисками — 0,2-1,3 мкм, максимальна глибина рисок — до 6 мкм, кут перетину рисок — 55-65°.

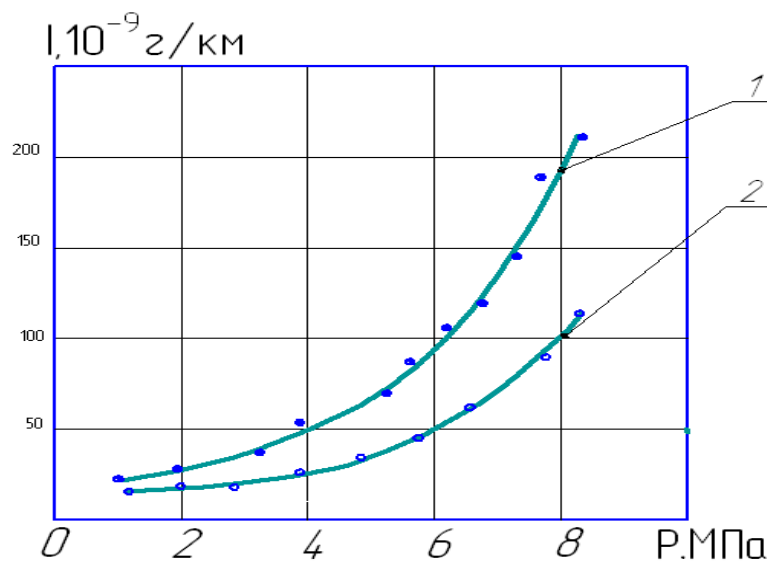


Рисунок 3.26 - Зносостійкість поверхонь в залежності від навантаження: 1 - обробка алмазними брусками на металевій зв'язці; 2 - обробка алмазними брусками на вулканітовій зв'язці

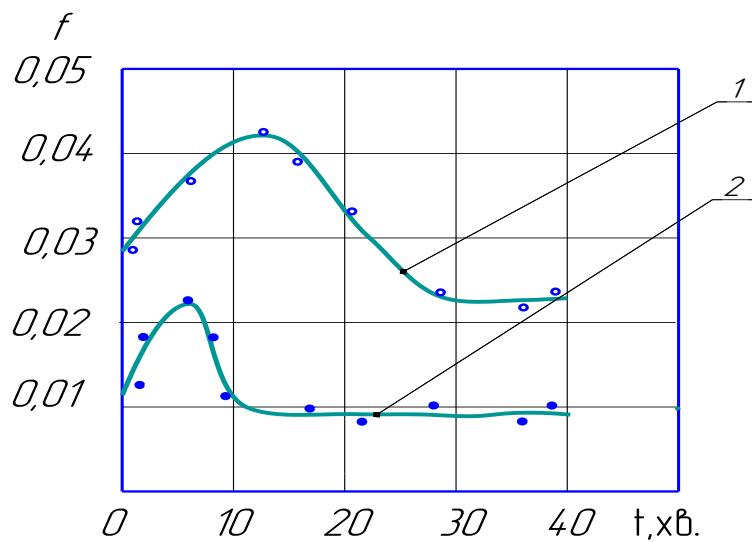


Рисунок 3.27 - Дослідження зміни коефіцієнта тертя f в залежності від часу випробування: 1 - обробка алмазними брусками на металевій зв'язці; 2 - обробка алмазними брусками на вулканітовій зв'язці

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

4.1. Обґрунтування ефективності прийняття рішень на основі аналізу технологічного процесу відновлення ГЦ з застосуванням хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці

При розробці операції розточування величину нормалізованого ремонтного розміру встановлюють залежно від величини і характеру зносу робочої поверхні гільзи циліндра, а також від припуску на механічну обробку, тобто

$$D_{P_i} = D_{P_{i-1}} + u + 2 \cdot Z_p + 2 \cdot Z_x, \quad (4.1)$$

де $D_{P_{i-1}}$ – попередній розмір гільзи, мм; D_{P_i} – ремонтний розмір гільзи, мм ($i = 1, 2, 3$); u – знос гільзи, мм; $2Z_p$ – припуск на розточування, мм; $2Z_x$ – припуск на хонінгування, мм;

При використанні різців з пластинками з композиту 10 (ГЕКСАНІТ-Р) кути заточування повинні бути: $\varphi_1 = 35^\circ$; $\varphi_2 = 15^\circ$; $\alpha = 15^\circ$; $\delta = 15^\circ$.

Композити ефективніші за тверді сплави, оскільки дозволяють проводити розточування на вищих швидкостях різання, зберігаючи при цьому високу зносостійкість, і підвищують продуктивність праці в 2-5 разів.

Розточування гільзи циліндрів проводиться під найближчий ремонтний розмір, який визначається по формулі:

$$D_p = D_{p-1} + \delta, \quad (4.2)$$

де D_{p-1} – попередній розмір гільзи, мм; i – ремонтний розмір гільзи ($i = 1, 2, 3$); δ – ремонтний інтервал ($\delta = u + 2 \cdot Z_p + 2 \cdot Z_x$); u – знос гільзи, мм; $2Z_p$ – припуск на розточування, мм ($Z_p = 0,10.0,12$ мм); $2Z_x$ – припуск на хонінгування, мм ($Z_x = 0,03.0,05$ мм);

Можливість розточування гільзи під ремонтний розмір D_p визначається з умови, що $D_p - D_{\max} \geq (2 \cdot Z_p + 2 \cdot Z_x)$, де $D_{\max}$ – дійсний найбільший діаметр отвору гільзи.

Максимальний діаметр отвору ГЦ визначається вимірюванням за допомогою індикаторного нутроміра в зонах I-I, II-II, III-III і взаємно перпендикулярних площинах (А-А і Б-Б) відповідно до рис. 4.1.

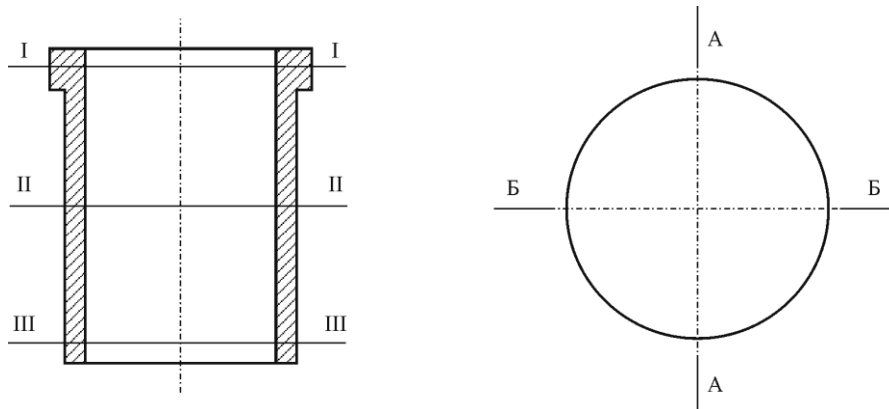


Рисунок 4.1. Схема вимірювання отвору гільзи.

Пояс I-I розташований нижче за вироблення від верхнього порошкового кільця II-II по середині гільзи; III-III – на 20 мм вище за нижній зразок гільзи.

Розрахунок режимів розточування.

Глибина різання визначається по формулі:

$$t = \frac{D_{P_i} - (D_{\min} + 2 \cdot Z_x)}{2}. \quad (4.3)$$

Необхідний виліт різця визначається по формулі:

$$L = \frac{D_{P_i} - d_{\text{шп}} - 2 \cdot Z_x}{2}, \quad (4.4)$$

де $d_{\text{шп}}$ – діаметр шпінделя верстата, мм., $d_{\text{шп}}$ – діаметр шпінделя верстата, мм; L – виліт різця, мм; D_{P_i} – розрахунковий ремонтний розмір гільзи, мм; $2 \cdot Z_x$ – припуск на хонінгування, мм.

Частота обертання шпінделя верстата встановлюється залежно від розміру розточуваного циліндра і необхідної швидкості різання V :

$$n = \frac{1000 \cdot V}{3,14 \cdot D_{P_i}}. \quad (4.5)$$

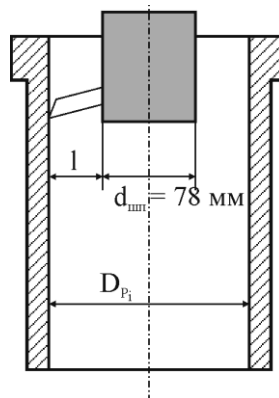


Рисунок 4.2. Установка різця.

Швидкість різання і подача приймається згідно даних таблиці 2, з подальшим коректуванням частоти обертання шпінделя і подачі з урахуванням паспортних даних верстата Основний машинний час визначається по формулі:

$$T_o = \frac{l \cdot i}{n \cdot s}, \quad (4.6)$$

де l – розрахункова довжина обробки, мм; n – частота обертання шпінделя верстата; s – подача різця, мм/хв⁻¹; i – число проходів.

Розрахункова довжина обробки визначається як сума наступних доданків: $l = l_1 + l_2 + l_3$, де l_1 – висота гільзи циліндра, мм; l_2 і l_3 – відповідно довжина урізування і пробігу різця, в мм (від 2 до 7 мм).

Цикл хонінгування складається з п'яти основних етапів:

1. Введення хонінгуювальної головки в отвір. Вводиться хонінгуювальна головка в отвір без обертання із стислими брусками, при мінімальній швидкості зворотно-поступального руху ($V_{вп}$).

2. Розтиск брусків. Після введення хонінгуювальної головки в отвір включається розтиск хонінгуювальних брусків, тиск в гідравлічній системі, подача ЗОР в зону обробки. Робоче положення хонінгуювальної головки займає після усунення зазорів між брусками і оброблюваним отвором.

3. Хонінгування. Етап хонінгування складається з трьох циклів – прироблення, основний цикл, виходжування. На початку процесу хонінгування відбувається режим прироблення брусків, при цьому процес проходить при пониженому тиску брусків на ГЦ – не більше 0,1-0,2 МПа. Основний цикл хонінгування ведеться при постійному тиску. В кінці хонінгування, при виходжуванні робота ведеться на пониженому тиску.

4. Стиснення брусків виконується автоматично при зниженні тиску в гідравлічній системі радіальної подачі.

5. Виведення хонінгуювальної головки з отвору, контроль геометричної точності і шорсткості.

7. Вимоги до технологічної змащувально – охолоджуючої рідини (ЗОР)

При виконанні операції хонінгування необхідно індикаторним нутроміром провести вимірювання отвору під поршень по схемі мал. 2.

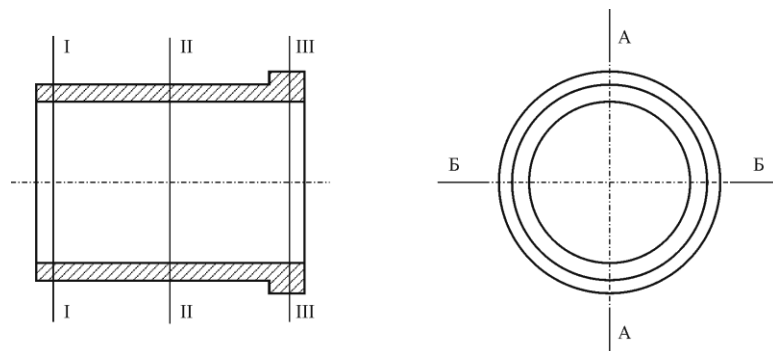


Рисунок 4.3 - Схема вимірювання отвору гільзи

Визначити відхилення форми отвору Δ : овальність, конусність, сідлоподібність.

$$\Delta = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{2}, \quad (4.7)$$

де $D_{\min}$ і $D_{\max}$ – найбільший і найменший діаметр, мм.

Визначити величину припуску a_x в мм по формулі (10, с. 69):

$$a_x = (\Delta_1 - \Delta_2) \cdot K_1 + K_2 \cdot R_{a1}, \quad (4.8)$$

Δ_1 – найбільша середня величина відхилення форми отвору, мм.

Δ_2 – допустиме відхилення форми отвору після хонінгування.

Для гільз овальність і конусність остаточно оброблених гільз не повинне перевищувати 0,02 мм. Бочкоподібність і сідлоподібність повинне бути не більше 0,01 мм. Більша підстава конуса повинна бути в нижній частині гільзи;

K_1 – коефіцієнт, що характеризує можливість виправлення погрешностей. Приймають $K_1 = 1,5$;

K_2 – коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхні до хонінгування. При зменшенні шорсткості в 2-3 рази приймають $K_2 = 1,0-1,1$, а при зменшенні її в 4 рази і більш $K_2 = 1,20-1,25$;

R_{a1} – шорсткість поверхні до хонінгування, мм. Після розточування гільзи циліндрів $R_{a1} = 2,5.1,25$ мкм ($25 \cdot 10^{-4}.12,5 \cdot 10^{-4}$ мкм);

Після хонінгування гільз циліндрів $R_{a2} = 0,32.0,16$ мкм ($3,2 \cdot 10^{-4}.1,6 \cdot 10^{-4}$ мкм).

До режимів різання відноситься: окружна швидкість $V_{ок}$, м/хв; питомий тиск брусків Руд, МПа (кгс/см²); швидкість зворотно-поступального руху $V_{вп}$, м/хв.

При призначенні режимів алмазного хонінгування обмежуючим чинником є $V_{вп}$. Висока швидкість $V_{вп}$ викликає вібрацію в процесі хонінгування.

Для чавуну з $Hv < 250$ при попередньому хонінгуванні $V_{вп} = 15$ м/хв і вище, а при чистовому і багатократному – $V_{вп} = 10.15$ м/хв [50, с. 101].

На вертикально-хонінгувальному верстаті 3КВ33:

$V_{вп} = 10,0$ м/хв ; $V_{вп2} = 12,0$ м/хв ; $V_{вп2} = 16,0$ м/хв ;

Окружну швидкість $V_{ок}$ призначити по відношенню :

$$\lambda = \frac{V_{ок}}{V_{вп}},$$

де λ – коефіцієнт. Для чавуну при попередньому хонінгуванні $\lambda = 3.5$, а при остаточному і одноразовому – $\lambda = 1,5 \dots 4$.

Тоді $V_{ок} = \lambda \cdot V_{вп}$.

Визначають $V_{ок}^{\min}$ і $V_{ок}^{\max}$.

Із зменшенням значення λ підвищується інтенсивність самозаточування брусків і росте продуктивність різання, але збільшується параметр шорсткості. При збільшенні значення λ бруски швидше притупляються, але зменшується параметр шорсткості поверхні.

Пропорційне підвищення $V_{ок}$ і $V_{вп}$ збільшує продуктивність різання, при цьому параметр шорсткості поверхні змінюється мало.

Визначають частоту обертання хонінговальної головки $n_{\min}$ і $n_{\max}$ по формулах:

$$n_{\min} = \frac{318 \cdot V_{ок}^{\min}}{D} \quad \text{і} \quad n_{\max} = \frac{318 \cdot V_{ок}^{\max}}{D}.$$

Отримані величини погоджують з паспортними даними верстата.

Визначити довжину ходу хонінгувальної головки L_x в мм по формулі :

$$L_x = L + L_{пв} + L_{пн} - l \quad (4.9)$$

де $L_{пв}$ – перебігання брусків вгору, мм; $L_{пн}$ – перебігання брусків вниз, мм;

Значення величин перебігів вибирають залежно від погрішності форми отвору (рис. 4.4).

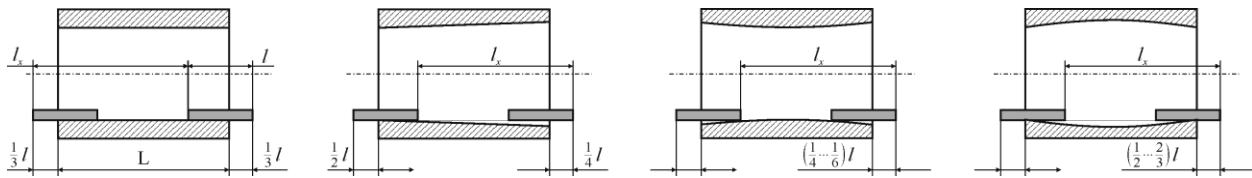


Рисунок 4.4 - Перебігання брусків при хонінгуванні отвору з різними відхиленнями форми отвору в початковому стані.

Визначити осьове зусилля на штоку P_0 в кгс розтиску брусків по формулі :

$$P_0 = P_{y\theta} \cdot l \cdot B \cdot N \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \theta), \quad (4.10)$$

де j – кут конуса розтиску в градусах. Приймають $j = 10-150$; q – кут тертя в градусах. $q = 60$.

Питомий тиск брусків $R_{\text{пит}}$ при хонінгуванні чавуну:

попереднє хонінгування – $R_{\text{пит}} = 0,8-1,2$ МПа (8.12 кгс/см²)

чистове хонінгування – $R_{\text{пит}} = 0,3-0,6$ МПа (3.6 кгс/см²)

Визначити машинний час по формулі:

$$T_m = \frac{P_1}{P_2}, \quad (4.11)$$

де P_1 – число подвійних ходів, необхідне для зняття припуску;

P_2 – число подвійних ходів бабки шпінделя в 1 хв;

Число подвійних ходів P_1 визначають по формулі:

$$P_1 = \frac{a_x}{b}, \quad (4.12)$$

де b – шар металу, що знімається за один подвійний хід, мм. Для чавуну $b = 0,002$ мм.

Число подвійних ходів бабки шпінделя визначають по формулі:

$$P_2 = \frac{1000 \cdot V_{\text{en}}}{2 \cdot L}. \quad (4.13)$$

Після підстановки у формулу 10 формул 10.10 і 10.11 отримаємо:

$$T_m = \frac{a_x \cdot L}{V_{\text{en}} \cdot 1000}.$$

Встановити вибрані режими на верстаті і провести обробку деталі на хонінговальному верстаті.

ВИСНОВКИ

1. Проведені експериментальні дослідження показали, що хонінгування брусками на металевій зв'язці не забезпечує отримання малих значень висотних параметрів шорсткості та досить великих значень відносної величини опорної довжини профілю. Найбільше впливом геть формування шорсткості надає зернистість алмазних брусків. Концентрація алмазів, кут сітки хонінгування та час не мають значного впливу на величину шорсткості.

2. Збільшення зернистості алмазних зерен та кута сітки хонінгування призводить до зростання середнього кроку нерівностей профілю 5τ та зменшення щільності виступів профілю R . Зміна концентрації та часу хонінгування не істотно впливає на ці параметри шорсткості.

3. Час хонінгування є важливим фактором, що дозволяє регулювати форму мікрорельєфу обробленої поверхні. Оптимальною тривалістю процесу хонінгування алмазними брусками на вулканітовій зв'язці слід вважати 30...60 секунд.

4. Поверхні циліндрів, оброблені алмазними брусками на металевій

зв'язці мають малу несучу здатність, що несе, зумовлену невеликою величиною відносної опорної довжини профілю, яка відповідно становить 5... 10 % на відносній висоті перерізу 30...35 % і 6... 30% при рівні перерізу 30...40%. Така поверхня циліндрів призводить до досить великого діаметрального зношування пари циліндр - поршень, величина якого може досягати 16,4 мкм,

5. Експериментально встановлено, що при хонінгуванні брусками на вулканітовій зв'язці забезпечується величина відносної довжини опорної профілю 95...97 % при рівні перерізу 30...40%. Одержання поверхні оброблених циліндрів з такою великою опорною поверхнею пояснюється можливістю занурення алмазних зерен у еластичний шар та малою глибиною різання окремими зернами. Великі значення відносної опорної довжини профілю в поєднанні з малою величиною шорсткості = 0,06 мкм, що забезпечуються при хонінгуванні брусками, визначають зрештою значно менший знос поверхні пари циліндр - поршень. Хонінгування брусками на вулканітовій зв'язці забезпечує величину діаметрального зносу пари циліндр - поршень у межах до 4 мкм.

6. Практична реалізація результатів досліджень здійснена при розробці та впровадженні технологічної операції алмазного хонінгування в КАТП «Агробудавтосервіс». В результаті машинний час на операції хонінгування гільзи зменшився з 2 до 1 хв., на операції остаточного хонінгування — з 1,0 до 0,4 хв., а штучний час — з 7,0 до 4,1 хв. Продуктивність процесу ремонту гільз підвищилася в 1,34 разу. Тривалість холодного прироблення гільз скоротилася на 10 хв.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Priest M., Taylor C.M. Automobile engine tribology - approaching the surface, Wear. 2000, No. 241. Pp. 193-203.
2. Taylor C.M. Automobile engine tribology - design considerations for efficiency and durability, Wear. 1998, No. 221. Pp. 1-8
3. Abeln T. Reibungsminderung durch Laseroberflächenstrukturierung im Motorenbau, 3 VDI-Fachtagung "AZylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel", Marz 2006, VDI-Berichte 1906. Pp. 7-8.
4. Microhoning Automotive Cylinder Bores, Cross Hatch, Vol. 9, No. 4, Nov.- Dec. 1957, Schrift der Fa. Micromatic Hone Corporation, Detroit, Michigan
5. ASME B46.1. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). The American Society of Mechanical Engineers, 1996. 120 p.
6. Kulikov, M.Yu., Achievement of precision accuracy of openings in gas turbine engines details/ M.Yu.Kulikov; R.E. Rygin; D.A. Nechaev// Proceedings of the International Technical Conference precision engineering ICPM - 2013, Miskolc Egyetem (Hungary). – 2013. - p.491- 496.
7. Кисликов В. Ф. Будова й експлуатація автомобілів / В. Ф. Кисликов, В. В. Лушик. - Київ: Либідь, 2006. - 400 с. - (6-те).
8. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД [Текст] / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк [и др.]. - Запорожье : Мотор Сич, 2005. - 559 с.
9. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки [Навчальний посібник] / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. - Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. - 208 с.

10. Форнальчик Є.Ю., Олісєвнч М.С., Мاستикаш ОЛ., Пельо Р.А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: Навчальний посібник. – Львів: Афіша, 2004.-492 с.
11. Канарчук В.Є., Лудченко О.А., Чигиринець А.Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів: Підручник. – К.: Вища шк., 1994. – (У 3-х кн.): Кн. 1: Теоретичні основи: Технологія. – 342 с; Кн. 2: Організація, планування і управління. – 383 с; Кн. 3: Ремонт автотранспортних засобів. – 599 с.
12. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends. Woodhead Publishing, 2010. XXX, 1018 p.
13. Сандомирський М.Г. Трактори та автомобілі. Ч.1. Автотракторні двигуни // Навчальний посібник / М.Г. Сандомирський, М.Ф. Бойко, А.Т. Лебедєв– К.: Вища школа, 2000. – 357с.
14. Маркович С. І. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / С. І. Маркович, О. В. Бевз ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. - 334 с.
15. Ionsson R. Richten warmebehandelter Werksticke. II HTM: Harter. - techn. Mitt.- 1998.-53, №1.-5-8.
16. Verbesserung der Tecmlologie der Werkstuckverfestigung durch plastische Oberflächenverforrnung I Belkin L. M. etc. II Maschinenbautechnik. - 1989. -38, №12.
17. Сандомирський М.Г. Трактори та автомобілі. Ч.1. Автотракторні двигуни // Навчальний посібник / М.Г. Сандомирський, М.Ф. Бойко, А.Т. Лебедєв– К.: Вища школа, 2000. – 357с.
18. Сахно В. П. Експлуатаційні властивості автомобілів / В. П. Сахно. – К.: Видавництво “КВІЦ”, 2006. – 174 с.
19. Клімов С.В. Організація технічного сервісу машин: Навчальний посібник, – Рівне: НУВГП, 2011 – 120 с.