

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Удосконалення операції хонінгування з метою зниження зносу
абразивного інструменту»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Титаренко С.В.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Сергієнко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шевченко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Удосконалення операції хонінгування з метою зниження зносу абразивного інструменту»: 124 с., 15 табл., 30 рис., 52 джерела.

ХОНІНГУВАННЯ, ЗНОС, АБРАЗИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ,
МІКРОГЕОМЕТРІЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ,
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процес хонінгування алмазним інструментом з переривчастою робочою поверхнею.

Мета магістерської роботи – удосконалення операції хонінгування з переривчастою робочою поверхнею алмазного інструмента.

Методи дослідження – теоретичні дослідження виконані з використанням математичного опису мікрогеометрії абразивного інструмента й експериментально - розрахункової методики її дослідження. З використанням методів планування експерименту проводилися експериментальні дослідження на спеціальних стендах. Обробка результатів експериментів проводилися за допомогою методів математичної статистики.

У першому розділі виконано аналіз використання операції хонінгування алмазним інструментом в технології обробки металів та розглянуто методику експериментального дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів.

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування методики дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів та наведена методика експериментального дослідження алмазних хонінговальних брусків.

У третьому розділі виконано дослідження закономірностей підвищення тиску шламу й МОР.

У четвертому розділі виконано експериментальне дослідження процесу хонінгування чавунних гільз ДВС хонінгувальними брусками з переривчастою робочою поверхнею й без.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	6
ВСТУП.....	7
1 Аналіз використання операції хонінгування алмазним інструментом в технології обробки металів.....	8
1.1 Мікрогеометрія ріжучої поверхні інструмента	10
1.1.1 Методика експериментального дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів.....	10
1.1.2 Математичний опис ріжучої поверхні абразивних інструментів.....	12
1.2 Закономірності мікрорізання одиничними абразивними зернами.....	16
1.3 Статистичні закономірності масового впливу абразивних зерен на деталь.....	19
1.4 Мікроявища при хонінгуванні.....	21
1.4.1 Швидкість знімання металу.....	22
1.4.2 Силкові явища.....	23
1.4.3 Теплові явища.....	25
1.4.4 Зношування брусків і наростоутворення.....	26
1.4.5 Якість обробки деталей.....	27
1.5 Способи підвищення якості обробленої поверхні при хонінгуванні й зниження зношування абразивного інструмента....	27
1.6 Мета та задачі дослідження.....	38
2 Мікрогеометрія хонінговальних брусків і методика її дослідження	39
2.1 Математичний опис мікрогеометрії абразивно-алмазних інструментів.....	39
2.2 Теоретичне обґрунтування методики дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів.....	43

2.3	Методика виміру пружних деформацій інструмента.....	46
2.4	Експериментальне дослідження алмазних хонінговальних брусків.....	48
2.4.1	Устаткування й техніка вимірів.....	48
2.4.2	Результати експериментальних досліджень пружних деформацій.....	49
2.4.3	Результати експериментальних досліджень форми зерен і закону розподілу їх по висоті.....	53
3	Дослідження закономірностей підвищення тиску шламу й МОР у підбрусковому просторі на процес хонінгування.....	63
3.1	Дослідження закономірностей підвищення тиску шламу й МОР.....	63
3.1.1	Рух шламу.....	63
3.1.2	Рух МОР.....	65
3.2	Вплив тиску шламу й МОР у підбрусковому просторі на процес хонінгування.....	71
3.3	Хонінгування брусками з переривчастою робочою поверхнею.....	74
4	Експериментальне дослідження процесу хонінгування чавунних гільз ДВС хонінгувальними брусками з переривчастою робочою поверхнею й без.....	76
4.1	Умови проведення й обґрунтування плану експериментів.....	76
4.2	Результати експериментального дослідження для алмазного хонінгування за планом ПФЕ 24.....	82
4.3	Порівняння теоретичних і експериментальних положень.....	87
4.4	Результати випробувань хонінгувальних брусків з переривчастою робочою поверхнею.....	103
5	Охорона праці та техніка безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.....	109
5.1	Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності.....	109
5.2	Вимоги перед початком робіт.....	113

5.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи.....	113
5.4 Вимоги безпеки після виконання роботи.....	116
5.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	116
ВИСНОВКИ.....	118
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	120

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

HB – твердість за Бринелем

HV – твердість за Вікерсом

HRC – твердість за Роквелом

MOP – мастильно-охолоджуюча рідина

k – постійна Больцмана, Дж/К

$\omega_{кр}$ – критичне значення пошкодженості

σ_m - межа плинності приконтаткних шарів тіла, що зношується

J_h – інтенсивність зносу, мм³/км

δ - інтенсивність зношування інструменту, мкм/км

V - об'єм зношеної частини різця, мм³

ρ - щільність інструментального матеріалу, кг/м³

σ_T - межа плинності інструментального матеріалу, МПа

n_T - запас пластичної міцності інструменту

n – кількість дослідів

T – температура, К

σ_s - напруга плинності, МПа

σ_b – границя міцності, МПа

σ_t – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, МПа

σ_{-1} – границя втоми, МПа

ψ – відносне звуження, %

μ - коефіцієнт Пуасона

ВСТУП

Хонінгування займає одне із провідних місць серед сучасних способів фінішної обробки деталей, який дозволяє розв'язати ряд технологічних завдань: виправлення погрішностей форми, малої шорсткості оброблюваної поверхні ($Ra = 1,25 — 0,16$ мкм) і одержання високої точності розмірів (5 — 6 квалітет).

Хонінгування широко застосовують при фінішній обробці посадкових діаметрів внутрішніх кілець підшипників, зубчастих коліс пневмо- і гідроциліндрів і т.д. Дана обробка є однією з остаточних операцій технологічного процесу, яка забезпечує якість поверхні готової деталі, що значно впливає на довговічність виробів.

Але в хонінгуванні, як і в інших видах фінішної обробки, є проблема - велике зношування абразивного інструмента. З ростом вимог до надійності деталей машин і експлуатаційної стійкості, з'являється необхідність підвищення якості поверхонь деталей. Крім того, сучасні технологічні прийоми повинні мати чітку наукову й практичну базу, що дасть ефективно використовувати можливості фінішної обробки при цьому максимально надійно.

Для досягнення високої точності й чистоти хонінгуємих деталей, підвищення продуктивності й економічності обробки, удосконалення хонінгувального інструмента, а також створення автоматизованих систем керування процесом необхідне вивчення закономірностей і визначення функціональних залежностей показників якості й ефективності хонінгування від його основних технологічних показників.

Незважаючи на наявні досягнення, закономірності процесу різання при хонінгуванні досліджені не повністю, не всі спостережувані на практиці явища одержали задовільне теоретичне пояснення. Зазначені недоліки утрудняють оптимальне керування процесом і його подальше удосконалення. Тому проблема теоретичного дослідження закономірностей і підвищення ефективності хонінгування є досить актуальною.

1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЇ ХОНІНГУВАННЯ АЛМАЗНИМ ІНСТРУМЕНТОМ В ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

При хонінгуванні спостерігається складна система взаємозалежних процесів і явищ, що визначають, чи є процес масового мікрорізання поверхні деталі з безліччю дрібних різців-абразивних зерен.

Закономірності мікропроцесів різання багато в чому загальні для різних видів абразивної обробки, тому при аналізі сучасних уявлень про сутність хонінгування ми будемо опиратися також на роботи, що відносяться до інших видів абразивної обробки.

Для детального розгляду сукупності явищ, спостережуваних при хонінгуванні, і обґрунтування завдань даного дослідження розглянемо структурну схему процесу хонінгування (рис. 1.1.). Як видно зі структурної схеми, в основі процесу хонінгування лежить вплив (1) ріжучої поверхні абразивного інструмента (2) на поверхню оброблюваної деталі (3), результатом якого є армування геометрії її поверхні. У той же час деталь, діючи на інструмент, формує рельєф його ріжучої поверхні.

Керуючими, або вхідними факторами є: характеристики хонінгувальних брусків (4) і спеціальні впливи на їхню поверхню (5) такі як, просочення, особливості форми брусків тощо; кінематика процесу (6); мастильно-охолоджуюча рідина (МОР) (7); спеціальні впливи на процес (8), наприклад, накладення вібрацій, підведення електричного струму тощо; матеріал (9) і вихідний стан оброблюваної деталі (10, 11); зусилля на розтискному штоку хонголівки, створюване механізмом навантаження верстата (12).

До вихідних параметрів належать: швидкість знімання металу (13); зношування інструмента (14); теплові явища (15); зусилля різання (16); мікрогеометрія поверхні (17) і погрішність форми (18) оброблюваної деталі; рух шламу і МОР (19).

Параметри устаткування: механізм хонінгувальної головки (20); система інструмент-деталь (21).

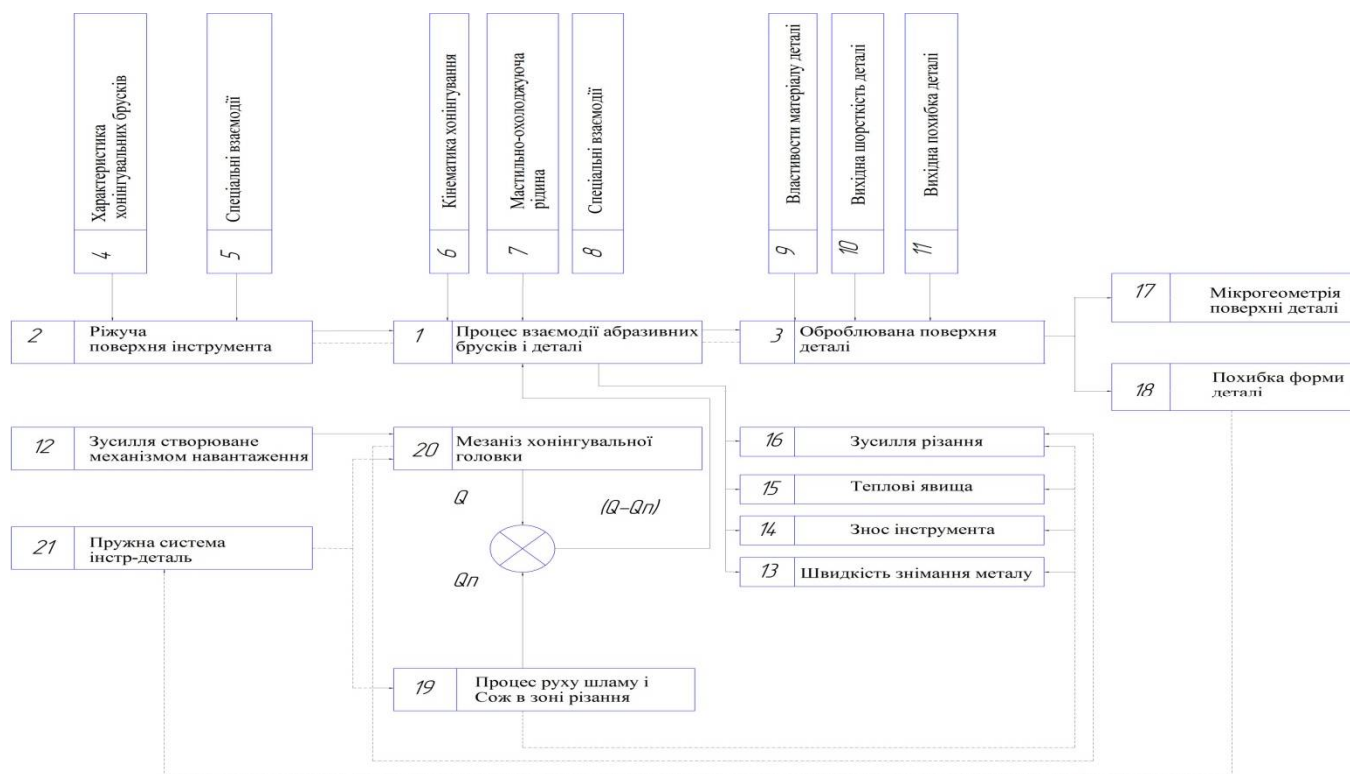


Рисунок 1.1 – Структурна схема процесу хонінгування

Великий вплив на хонінгування виявляють зворотні зв'язки між вихідними й вхідними факторами, основні причини цього наступні:

- а) підвищення тиску шламу й МОР при їхньому русі в підбрусковий простір;
- б) наявність тертя в механізмі розтиску брусків, величина якого залежить від зусиль різання й зусиль деформування деталі, викликаних погіршністю її форми.

Різні явища при хонінгуванні досліджені не однаково докладно, окремі питання розроблені досить глибоко, а деякі виявилися поза полем зору фахівців.

Огляд літератури й визначення питань, що підлягають дослідженню, доцільно провести в тій послідовності, яка відповідає взаємозв'язку фізичних явищ і яка відбита на структурній схемі процесу хонінгування. Тому, спочатку розглянемо загальні закономірності абразивної обробки:

- а) мікрогеометрію ріжучої поверхні інструмента, методи її дослідження;
- б) процес впливу одиничного зерна на метал,

в) масове різання сукупністю зерен інструмента.

Потім проаналізуємо специфічні закономірності хонінгування, тобто вплив різних факторів на знімання металу, зусилля різання, теплові явища, якість обробки деталі тощо.

1.1 Мікрогеометрія ріжучої поверхні інструмента

Мікрогеометрія абразивного інструмента є одним з важливих факторів, що визначають механічні процеси різання й пластичного деформування металу, вона прямо або побічно впливає на всі закономірності абразивної обробки.

Теорії, що дозволяють вірогідно розраховувати параметри мікрогеометрії інструмента виходячи з його фізико-механічних властивостей і умов роботи відсутні. Тому ми зупинимося на експериментальних способах дослідження мікрогеометрії й методиці її математичного опису.

1.1.1 Методика експериментального дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів

Найбільш складним питанням є дослідження й математичний опис не окремих зерен, а мікрогеометрії поверхні інструмента в цілому, яка характеризується статистичними параметрами форми вершин абразивних зерен, а також розподілом їх по висоті й по площині ріжучого шару.

Розподіл зерен по площині можна зафіксувати шляхом спостереження через оптичний мікроскоп або поверхні самого інструмента, або його відбитки на м'якому матеріалі. Складніше знайти закон розподілу зерен по висоті, тому що запропоновані для цієї мети методи виявилися або надмірно трудомісткими, або недостатньо точними.

Зазначений недолік подолав Фрагін І.Е. [1]. Він прокочував алмазний хонінгувальний брусок по плитці Йогансона, на поверхню якої був нанесений електролітичним методом шар олова заданої товщини. Міняючи товщину осадженого шару можна знайти розподіл зерен по висоті.

Інший варіант контактного методу розробили японські вчені Окамура К. і Накадзима Т. [2]. До абразивного кола притискається контактний ролик і між

ними подаються три стрічки - перша із целофану, друга з копіювального паперу, третя зі звичайного паперу. Коло приводиться в обертання й кількість відбитків, отриманих на папері, дає нам число абразивних зерен, що перебувають у шарі інструмента по товщині, рівному товщині всіх стрічок, Накаяма К. [3] використовував контактний ролик, що має зовнішню поверхню у вигляді здвоєного конуса з кутами твірних 1^0 , що дало можливість знаходити не тільки загальну кількість зерен, але і їх розподіл по висоті.

Перераховані контактні методи досить прості, але мають низьку точність, тому початкова ділянка кривої розподілу зерен по висоті залишається невизначеною.

Високу точність мають методи дослідження поверхні інструмента за допомогою щупових приладів. Одержувана при записі коливань щупа профілограма містить інформацію про ріжучі властивості інструмента, оскільки на ній відбиті абразивні зерна. Для виділення ділянок профілограми, що відповідають абразивним зернам, запропоновано записувати додатковий сигнал, використовуючи токопровідність металевих зв'язувань. Зручність методів полягає в простоті й точності запису рельєфу ріжучої поверхні, однак висота й форма виступів на профілограмі не збігаються з висотою й формою профілю вершин абразивних зерен, тому що щуп приладу проходить через випадкові перетини зерен, а не через їхні вершини.

Таким чином, порівняння різних методів експериментального дослідження мікрорельєфу поверхні абразивних інструментів показує, що найбільшою точністю виміру й зручністю відрізняються методи профілографування, але жоден з відомих варіантів цих методів не дозволяє виміряти розподіл зерен по висоті. Тому досить бажана розробка таких методів дослідження, які дозволяли б одержувати зазначені характеристики абразивного інструмента за допомогою профілографування.

Мікрорельєф абразивного інструмента в процесі обробки змінюється за рахунок пружних деформацій зв'язування й окремих зерен під дією сил різання. Локальні пружні деформації кола при шліфуванні співрозмірні із глибиною

різання окремими зернами й тому суттєво впливають на механіку процесу шліфування.

При хонінгуванні ці явища також мають місце, особливо у випадку використання брусків на еластичних зв'язуваннях [4]. Однак у літературі немає даних по знаходженню пружнього постійного кріплення зерен у зв'язуванні хонінгувальних брусків, у зв'язку із чим має велике значення розробка зручної методики визначення пружних властивостей хонінгувальних брусків і оцінка впливу пружних деформацій на процес хонінгування.

1.1.2 Математичний опис ріжучої поверхні абразивних інструментів

У наукових дослідженнях застосовуються різні математичні моделі абразивних інструментів, які можливо умовно розділити на дискретні, безперервні, і дискретно-безперервні.

Оскільки інструмент містить зв'язування й абразивні зерна, то його робочій шар складається з ділянок з різко різними фізичними властивостями, і тому являє собою суттєво дискретну структуру. Із цього погляду ріжуча поверхня інструмента повинна представлятися дискретною моделлю, математичний опис якої зводиться до завдання трьох характеристик: форми профілю робочих вершин зерен, закону розподілу їх по висоті, а також закону розподілу по площині інструмента.

Існує також інший підхід, при якому поверхня інструмента розглядається як деяке однорідне випадкове поле, тобто приймається безперервна модель інструмента.

Дискретна модель більш реально відбиває будову абразивного інструмента, але наявні методи експериментального визначення її характеристик значно складніші.

Ряд авторів представляють робочу поверхню інструмента у вигляді набору безперервних ріжучих "елементарних профілів", що стоять один від одного на деякій відстані. У цьому випадку інструмент вважається безперервним в

одному напрямку й дискретним в іншому, тому можна говорити про дискретно-безперервну модель.

Розглянемо літературні дані із цих питань, для того, щоб вибрати найбільш прийнятний математичний опис інструмента.

а) Дискретна модель

Характеристики зводяться до геометрії вершин абразивних зерен, розподілу по висоті й площі інструмента.

У якості моделі робочої вершини зерен пропонувалися різні метричні тіла:

- конус;
- усічений конус;
- усічений конус, сполучений з півсферою;
- однопорожнинний гіперболоїд;
- параболоїд і інші.

Закон розподілу зерен по площині інструмента здаходиться з досить простих фізичних передумов методами теорії ймовірностей. Неважко довести, що якщо середня відстань між зернами в кілька раз перевищує їхній середній діаметр і вони розташовані незалежно друг від друга, то розподіл по площині близький до закону Пуассона:

$$P(n) = \frac{(z_0 \cdot S)^n}{n!} e^{-z_0 \cdot S} \quad (1.1)$$

де $P(n)$ - імовірність того, що на ділянці площею S виявиться рівно n вершин, зерен;

z_0 –середня кылькысть вершин на одиниці площі інструмента.

Розподіл вершин зерен по висоті не можна знайти з настільки простих фізичних передумов, тому що на нього впливає велика кылькысть факторів. Середня кылькысть вершин, що втримуються в одиниці об'єму інструмента, є постійним у глибині й плавно убуває поблизу поверхні, обертаючись далі в нуль (рис. 1.2, крива a). Стирання зерен у процесі роботи може привести до деякого збільшення числа вершин на певних рівнях, так що закон розподілу

здобуває горбоподібну форму (рис.1. 2, крива б) [5]. Таким чином, форма кривої розподілу залежить від співвідношення частки стирання, викрашування й виломлювання зерен у процесі виправлення й зношування інструмента й може мати вигляд, показаний на рис.1.2, а, б.

Аналітичний опис фактичної кривої розподілу досить складний, що утрудняє теоретичні побудови. Тому для апроксимації розподілу використовують різні залежності, що представляють зручність для дослідження.

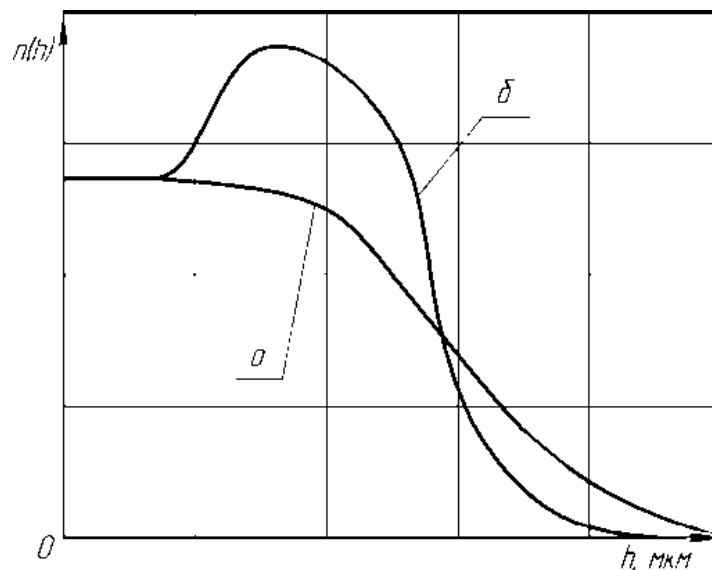


Рисунок 1.2 – Щільність розподілу зерен по висоті

Літературні джерела показують, що думки про аналітичний вид закону розподілу і його числових параметрах досить різні. Великою поширеністю користується нормальний закон, хоча фізичних передумов для появи такого симетричного розподілу немає. Гарне наближення початкової ділянки кривої розподілу можна одержати за допомогою статечної залежності

$$n(h) = \begin{cases} k \cdot h^B & \text{при } h > 0 \\ 0 & \text{при } h \leq 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

де $n(h)$ - щільність розподілу, тобто число вершин зерен, що перебувають в одиниці об'єму ріжучого шару інструмента на глибині h .

При $\beta=0$ формула (1.2) дає рівномірний розподіл. Наші дослідження підтверджують можливість статичної апроксимації тому в теоретичних розрахунках, заснованих на дискретній моделі, ми будемо користуватися залежністю (1.2).

б) Безперервна модель

Виступ поверхні абразивного інструмента у вигляді деякого безперервного випадкового поля дозволяє залучити до його опису добре розроблені математичні методи теорії випадкових функцій. Для завдання випадкової функції необхідно знати її статистичні характеристики, зокрема, закон розподілу. У деяких роботах закон розподілу ординат профілю інструмента приймає нормальний вигляд:

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \delta_z} e^{-\frac{(z-M_z)^2}{2 \cdot \delta_z^2}} \quad (1.3)$$

де $g(z)$ - щільність розподілу,

δ_z^2, M_z - дисперсія й математичне очікування.

Моделювання поверхні інструмента набором елементарних поверхонь другого або третього порядку сполучених між собою по границям. У цьому випадку, одержуємо не статистичний опис випадкового поля, а набір аналітичних виражень для апроксимації однієї з реалізацій. Тому застосування такого методу обмежується вузьким колом завдань.

в) Дискретно-безперервна модель

Представляємо абразивний інструмент сукупністю елементарних ріжучих профілів (ЕРП), використовуючи модель Пекленік Ж. [6], що стоять один від одного на відстані, рівному або більшому середнього розміру зерна, що й вважаються статистично незалежними.

Деякі визначають ЕРП як проекцію всіх зерен, укладених між сусідніми січними площинами, на одну з них, або в якості ЕРП приймають сам перетин - профілограму інструмента. У розрахунки, засновані на дискретно- безперервній моделі, свідомо вноситься погрішність, тому що при першому із зазначених

визначень ЕРП губиться статистична незалежність між окремими ЕРП, а при другому визначенні ЕРП не відбивають крайки зерен, що найбільше виступають, тому що вони, по більшій частині, не попадають у площину ЕРП.

1.2 Закономірності мікрорізання одиничними абразивними зернами

Для побудови математичної теорії процесу хонінгування необхідно знати механізм утворення подряпин при взаємодії одиничного зерна й поверхні металу.

Глибина різання абразивним зерном порівнянна з радіусом округлення його вершини, тому процес дряпання відбувається в досить несприятливих умовах при більших негативних передніх кутах, високому ступені пластичної деформації й значному терті.

Залежно від співвідношення глибини врізання h і радіуса ρ_3 вершини зерна можливі пружні й пластичні деформації, а також крихке руйнування матеріалу. Критичні значення відношення h/ρ_3 , що визначають перехід від одного виду деформування до іншого, залежать від фізико-хімічних властивостей металу й абразиву, від швидкості дряпання, мастильного середовища, характеру попередніх деформацій, випробуваних матеріалів тощо.

Пластичні деформації при ковзанні сфери по площині починаються, якщо:

$$\frac{h}{\rho_3} > C_{nl} = 2.4 \cdot \left[\frac{C_1 \cdot \delta_s \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]^2 \quad (1.4)$$

де C_{nl} – критерій переходу при пластичній деформації,

δ_s , E , μ – границя текучості, модуль пружності й коефіцієнт Пуассона для металу,

C_1 – коефіцієнт, що враховує складність напруженого стану і змінюється від 1 і 10.

Пружні деформації мають місце лише в дуже малому діапазоні глибини врізання, тому при розробці математичної моделі процесів абразивної обробки їх не враховують.

Підвищення глибини різання викликає пластичне деформування - метал витісняється з боків подряпини й утворюються навали, сумарна площа яких дорівнює площі канавки. Перед зерном, що рухається, виникає також виколування металу й хвиля деформації, що біжить поперед нього.

Перехід до різання починається, коли напруги, що сколюють, стають більше дійсного опору матеріалу зрізу, а це досягається при:

$$\frac{h}{P_3} > C_{рез} \quad (1.5)$$

А для випадку ковзання сфери по пластичному півпростору:

$$C_{рез} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\delta_s} \right) \quad (1.6)$$

де $C_{рез}$ - критерій переходу при різанні,

τ - міцність на зріз адгезійної зв'язки.

Наявність у зерна, розвиненого субмікропрофіля може значно знизити критичну глибину різання. На критичні точки впливають також і інші фактори, такі як, окисні плівки, змащення, швидкість і т.п., тому надійніше користуватися експериментальними, а не розрахунковими даними про величини $C_{пл}$, і $C_{рез}$.

Зусилля, що виникають у процесі дряпання, залежать від площ проекцій поверхні контакту зерна з металом S_y , S_z і умовних напруг зрізу δ_y , δ_z :

$$P_y = \delta_y \cdot S_y ; P_z = \delta_z \cdot S_z . \quad (1.7)$$

Нормальне зусилля P_z визначається аналогічно, з ростом глибини впровадження воно збільшується швидше, чим P_y , так що завжди $P_z / P_y > 1$. У припущенні ідеальної пластичності металу й сферичної форми зерна:

$$P_z = C_3 \cdot \pi \cdot \rho_3 \cdot \delta_s \cdot h, \quad (1.8)$$

де C_3 – коефіцієнт форми ($C_3 \approx 2.8$).

Приймаємо, що умовні напруги є постійними, при цьому зусилля P_y , P_z будуть прямо пропорційними площам відповідних проекцій поверхні контакту зерна з металом. Такий підхід часто найбільш прийнятний для практичних розрахунків, особливо якщо врахувати складність одержання

експериментальних даних про залежності умовних напруг від розмірів шару, що зрізується, і інших факторів.

За рахунок пластичних деформацій частини металу відтискується й утворюються навали по краях подряпин. Співвідношення обсягів зрізаного й пластично витиснутого металу характеризується коефіцієнтами стружкоутворення k_c і навалоутворення k_n .

$$k_c = 1 - k_n = \frac{V_c}{V_u} \quad (1.9)$$

де V_c – об'єм стружки,

V_u – об'єм металу, витиснутого з подряпини.

У зоні пластичних деформацій $k_c = 0$, зі збільшенням глибини впровадження він швидко підвищується до деякого значення й далі майже не змінюється. На рисунку 1.3 показана залежність k_c від глибини h при дряпанні чавуну алмазним конусом з кутом при вершині 120° , з якої видно, що для сірого чавуну значення k_n не перевищує 0.2 – 0.3 у великому діапазоні глибини [7]. Навалоутворення знижується зі зменшенням пластичності оброблюваного матеріалу, зі збільшенням гостроти зерен, з підвищенням швидкості різання. В умовах процесу хонінгування навалоутворенням ще менше, чим при дряпанні гладкої поверхні, оскільки зерна перетинають гребінці металу, що мають високий ступінь наклепу й, отже, низьку пластичність. Тому в першому наближенні для матеріалів низької пластичності, як, наприклад, сірий чавун, видавлювання металу по краях подряпин можна не враховувати.

У певному діапазоні швидкостей різання, наприклад, для сталі 20 від 0.02 до 5 (м/с), на поверхні абразивного зерна виникає нарост. Наростоутворення, з одного боку, поліпшує геометрію ріжучої частини зерна, але, з іншого боку, приводить до погіршення чистоти обробленої поверхні за рахунок періодичних зривів наросту, а також до посилення забруднення інструмента.

Поява наросту веде до зміни зусиль різання й коефіцієнта стружкоутворення, але профіль подряпини залишається незмінним. тому що нарост не виходить за його межі. При різанні крихких, малопластичних

матеріалів, наприклад, чавуну, наростоутворення незначне і ним можна зневажити.

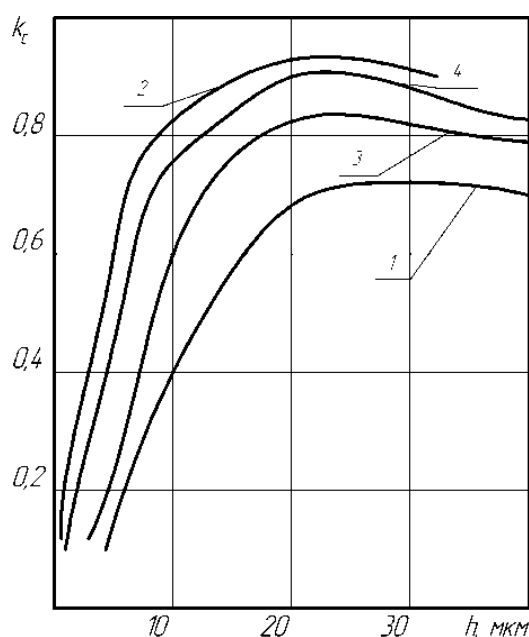


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта стружкоутворення від глибини дряпання чавуну (1 - високоміцного, 2 - білого, 3 - сірого, 4 - загартованого)

Розглянуті закономірності різання одиничними абразивними зернами дають можливість перейти до аналізу процесу масового впливу зерен на поверхню деталі, що відбувається при абразивній обробці.

1.3 Статистичні закономірності масового впливу абразивних зерен на деталь

Вивчення закономірностей масового впливу абразивних зерен на поверхню оброблюваної деталі є однією з важливих і найбільш важких проблем у теорії абразивної обробки.

Перша спроба створення математичної теорії абразивного різання була зроблена в 1914 році Елденом [8], який розглянув найбільшу товщину стружки при круглому зовнішньому шліфуванні вподібнивши коло фрезі. Починаючи з 1914 року й, приблизно, до 1960 року теорія розбудовувалася на основі уявлень про абразивний інструмент, як тверде тіло з упорядкованим розташуванням ріжучих кромки (детермінована модель).

Велику цікавість представляють дослідження мікрогеометрії обробленої поверхні при шліфуванні.

Ориока С. [9] вивів формулу для розрахунків середньоквадратичної висоти $H_{ск}$ нерівностей при круговому шліфуванні, причому профіль зерен був прийнятий конічним, а розподіл зерен по висоті описувався параболою другого порядку. Подібні залежності були, але при трохи інших вихідних передумовах.

Для статичного розподілу по висоті й параболічної форми зерен визначили середню висоту нерівностей шліфованої поверхні:

$$H_{cp} = \frac{1}{1.5 + \beta^{1.5}} \cdot H_0^{\frac{\beta}{\beta+m+0.5}} \cdot \left[\frac{(1.5 \cdot C)^m \cdot (1.5 \cdot m + \beta^{1.5m})}{2 \cdot z_0 \cdot \left(1 + \frac{V_u}{V_d}\right) \cdot \sqrt{D}} \right]^{\frac{1}{\beta+m+0.5}}, \quad (1.10)$$

де D – діаметр кола,

V_d, V_u – швидкість деталі й кола,

C, m – параметри, що описують параболічну форму зерна (1.1),

z_0 – число абразивних зерен на одиницю площі круга,

H_0 – глибина ріжучого шару на колі,

β – показник ступеня розподілу зерен по висоті.

$$P(h) = z_0 \cdot \left(\frac{h}{H_0} \right)^\beta. \quad (1.11)$$

Важливою характеристикою мікрогеометрії обробленої поверхні є закон розподілу нерівностей по висоті $P(h)$. Знання цієї функції дозволяє не тільки визначити числові параметри висоти мікронерівності $Ra, H_{ск}, R_z$ і ін., але й розрахувати число контактних і ріжучих зерен, площі зрізу, зусилля тощо.

Пекленік Ж. [10] у своєму аналізі використовував взаємну кореляцію профілів інструмента й обробленої деталі, що дозволило підійти до шліфування як до процесу в динамічній системі. Їм же було введено поняття про елементарний ріжучий профіль (ЕРП). Филимонов Л.Н. [11], будує теорію абразивного різання виходячи з дискретно-безперервних моделей, при цьому

використовується поняття наведеного ріжучого профілю (НРП), обумовленого як максимум з накладення декількох незалежних ЕРП. Аврутин Ю.Д. [12] урахував, що при шліфуванні профіль деталі формується шляхом накладення ряду ЕРП, що мають послідовно мінливу глибину врізання.

1.4 Мікроявища при хонінгуванні

Масове мікрорізання металу абразивними зернами при хонінгуванні викликає ряд макропроцесів, що виражаються в зніманні металу й зношуванні інструмента, нагріванні інструмента й деталі, виникненні зусиль і деформацій, формуванні поверхневого шару деталі тощо.

Фрагін І.Е. [1] так представляє сутність явищ у контакті хонінгувального бруска й оброблюваної деталі. Спочатку циклу обробки за рахунок високої шорсткості поверхні й погрішності форми деталі розбудовуються більші питомі тиски й безліч абразивних зерен прориваючи мономолекулярний шар змащення, врізається в метал. При цьому контактують ювенільні поверхні інструмента й деталі, тому можливе утворення містків зварювання. За рахунок цих явищ різко зростає тангенціальна складова сили різання, швидкість знімання металу й зношування брусків.

Через 15 - 30 с настає другий етап: шорсткість деталі й погрішність форми набагато менше, збільшується кількість контактних зерен, знижується питомий тиск, контакт відбувається, в основному, через буферний шар змащення. Знижуються тангенціальні зусилля, швидкість знімання металу й зношування брусків. Останній етап характеризується постійними значеннями й невеликою величиною сили різання, знімання й зношування. Цей етап близький до суперфінішу і поліруванню, він забезпечує підвищену якість поверхні за рахунок пластичних деформацій при помірному розвитку фізико-хімічних явищ.

Циклічність хонінгування проявляється набагато більше при використанні абразивних брусків, чим алмазних. Це викликане невисокою міцністю зерен і

зв'язуванню абразивних брусків, через що в початковий момент відбувається сильне самогострювання, а потім поступове затуплення брусків.

Розглянемо експериментальні дані про вплив різних факторів на окремі параметри процесу хонінгування.

1.4.1 Швидкість знімання металу

Зі збільшенням радіального тиску швидкість знімання зростає, однак для абразивних брусків меншою мірою, чим для алмазних. Це пояснюється тим, що при високих питомих тисках зерна абразивних брусків обсипаються і гірше ріжуть метал.

Ріст абсолютної швидкості різання $V_{абс.р}$ при постійному значенні схрещування приводить до підвищення швидкості знімання, але не в прямій пропорційній залежності. З рисунка 1.4 видно, що, чим більше $V_{абс.р}$, тим менше приріст швидкості знімання, або навіть він стає негативним. Причини цього явища повністю не з'ясовані, але відомо, що при дуже високих швидкостях мастильна плівка розривається й частки знятого металу засолюють інструмент, тому знімання зменшується.

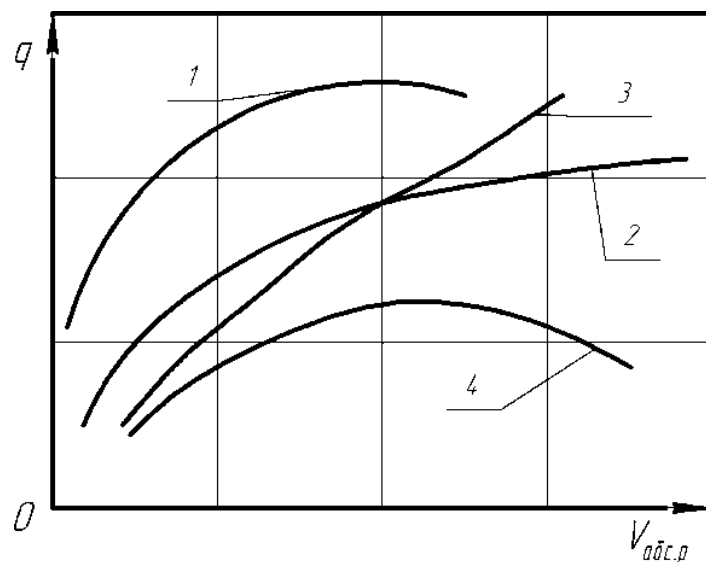


Рисунок 1.4 – Вплив абсолютної швидкості на знімання металу залежно від оброблюваного матеріалу й виду хонінгувальних брусків (1,2 – чавун, абразивні бруски; 3 - чавун, алмазні бруски; 4 - загартована сталь, алмазні бруски)

Кут схрещування ($tg\alpha = V_{ок}/V_{ос}$, де $V_{ок}$ – окружна швидкість, $V_{ос}$ – осьова швидкість) впливає на умови зрізання металу, розміщення стружки в підбрусковому просторі й відвід її із зони різання, самозагострювання брусків та ін. При зменшенні α і наближенні його до одиниці, поліпшуються умови зрізання стружки, яка стає дрібніше й краще відводиться з-під бруска, тому знімання металу збільшується. Однак поряд із цим погіршується чистота обробки й зростають інерційні зусилля на хонголівці.

Зернистість хонінгувальних брусків залежна від умов обробки впливає на швидкість знімання. Так, при алмазному хонінгуванні зменшення розмірів зерна алмазного бруска з АС200/160 до АС160/125 привело до збільшення швидкості знімання, у той час бруски зернистістю АСВ63/50 показали значно меншу швидкість знімання в порівнянні із брусками АС200/160. При 50% концентрації алмазів величина зерен майже не впливає на швидкість знімання.

Експериментально виявлена значна залежність знімання від в'язкості, або розтікання МОР по оброблюваному матеріалу, чим більше в'язкість, тем менше швидкість знімання. Задовільне пояснення цієї закономірності, також, як і нелінійної залежності знімання від швидкості різання, відсутнє.

Ми вважаємо, що більшу роль при цьому відіграють зворотні зв'язки по зусиллю притиску брусків, обумовлені рухом шламу й МОР у підбрусковому просторі, за рахунок чого виникає підвищений тиск у зоні різання. Висловлене припущення дозволяє не тільки пояснити ряд закономірностей процесу хонінгування, але й обґрунтувати деякі шляхи підвищення його ефективності.

На швидкість знімання мають також вплив властивості зв'язування, оброблюваний матеріал, вихідна шорсткість і погрішність форми деталі тощо.

1.4.2 Силіві явища

Зусилля різання виникають у результаті сумарного зняття мікростружок абразивними зернами, пластичного деформування металу, тертя зерен і зв'язування по поверхні деталі й стружку.

При хонінгуванні із заданим зусиллям притиску брусків радіальний тиск належить до елементів режиму різання, його середнє значення вважається постійним. Однак за рахунок зусиль різання, погрішностей форми деталей і тертя в механізмі хонінгувальної головки виникають зворотні зв'язки по зусиллю притиску брусків і тому фактичний тиск зазнає значних коливань. Ці явища недостатньо вивчені в літературі, приводилися спрощені й навіть суперечливі формули для розрахунків радіального тиску Q залежно від зусилля P на розтискному штоку хонголівки (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Залежності для розрахунків тиску (за даними літератури)

Джерело	Формула	Зауваження
[13]	$Q = \frac{P}{n_b} \cdot ctg \varpi$	Тертя не враховується
[14]	$Q = \frac{P}{n_b} \cdot ctg(\omega + p)$	Враховане тільки тертя в клиновій парі конус-колодка
[15, 16]	$Q = \frac{P}{n_b} ctg(\omega + 2p)$	Помилкова
[17]	$Q = \frac{P}{n_b} \cdot ctg(\omega \pm p) \pm \left(\frac{P}{n_b} \pm F_{oc} \right) \cdot \sin \rho$	Не враховується тертя бічних поверхонь колодок по корпусу хонголівки
Позначення: n_b – число брусків у хонголівці, ω – кут нахилу утворюючої конічного валика, ρ – кут тертя, F_{oc} – осьова складова сили різання, що доводиться на один брусок, Q – тиску, P – зусилля на розтискному штоку хонголівки.		

У зв'язку з цим виникла необхідність досліджувати вплив тертя в хонголівці й зворотних зв'язків по зусиллю притиску брусків на процес хонінгування. Для аналізу зусиль різання при хонінгуванні зручно використовувати коефіцієнт тертя-дряпання:

$$\mu = \frac{F_p}{Q}, \mu_{ok} = \frac{F_{ok}}{Q}, \mu_{oc} = \frac{F_{oc}}{Q}, \quad (1.12)$$

де F_p , F_{oc} , $F_{ок}$ – сила різання, осьова й окружна складова.

Q – радіальне зусилля притиску брусків.

Збільшення зернистості абразивних брусків веде до підвищення коефіцієнта μ , а збільшення зернистості алмазних брусків - до його зниження. Концентрація алмазів у зв'язуванні може по різному відбиватися на зусиллі різання. Так, для брусків із зернистістю АС200/160 з ростом концентрації коефіцієнт тертя-дряпання збільшується, а при хонінгуванні сталі 40Х брусками АСВ100/80 МІ - зменшується.

Співвідношення між осьовою і окружною складовими сили різання визначається, головним чином, кутом схрещування α , у першому наближенні можна записати, що:

$$\frac{F_{oc}}{F_{ок}} = \frac{\mu_{oc}}{\mu_{ок}} = \frac{V_{oc}}{V_{ок}} = \operatorname{tg}\alpha \quad . \quad (1.13)$$

Великий вплив на зусилля виявляють механічні властивості матеріалу, що оброблюється. З ростом міцності сили різання зростають, а коефіцієнт тертя-дряпання зменшується. Пояснюється це тим, що при незмінному радіальному тиску підвищення міцності металу зменшує глибину врізання зерен і площу поперечного переріза стружок, крім того бруски притупляються, що також знижує тангенціальне зусилля F_p .

1.4.3 Теплові явища

Теплові явища відіграють істотну роль у процесі хонінгування, оскільки від них залежать температурні деформації деталі й, отже, точність обробки, фізико-хімічний стан МОР, оброблюваного матеріалу й брусків.

Інтенсифікація режимів хонінгування у всіх випадках підвищує загальне тепловиділення й температуру, яка може досягати 150-200⁰С. При хонінгуванні загартованої сталі й чавуну нагрівання деталей приблизно однакове, але при обробці незагартованої сталі температура значно вище за рахунок більшої глибини врізання й інтенсивного тертя металу по зв'язці.

Алмазні бруски на металевій зв'язці створюють набагато меншу температуру, чим абразивні бруски. Це пов'язане з більш високої

температуропровідністю алмаза й металевій зв'язки, а також з більш низьким коефіцієнтом тертя алмазних зерен.

З підвищенням зернистості спостерігається зменшення тепловиділення, тому що при цьому знижується ступінь пластичного деформування металу. Аналогічний вплив виявляє зниження концентрації алмазів у брусках.

1.4.4 Зношування брусків і наростоутворення

Зношування абразивно-алмазних інструментів можна розділити на два, певною мірою самостійних, процеси - зношування властивості зерен і зношування зв'язки, у результаті якого зерна випадають без руйнування.

Зношування зерен абразиву в процесі різання може відбуватися за рахунок: розвитку тріщин (тендітне руйнування), пластичних деформацій, адгезії, дифузії, абразивної дії твердих включень.

Аналіз умов роботи зерен при хонінгуванні та дані експериментів свідчать про те, що переважними є крихке руйнування й адгезійні зношування зерен. Металева зв'язка алмазних брусків, головним чином, піддається абразивній дії стружки й адгезійному зношуванню. Зв'язка стирається швидше алмазних зерен, які випадають без руйнування. Це підтверджується ситовим аналізом розмірів алмазних зерен, витягнутих зі шламу після хонінгування.

Підвищення питомого тиску на бруски й швидкості різання збільшує зношування. Правильним добором складу й кількості МОР, що подається в зону різання, можна зменшити зношування в 3 - 8 разів.

Утворення наростів при хонінгуванні може відбуватися на вершинах абразивних зерен, що вже було розглянуто, а також на зв'язці, як результат впровадження й спресування стружки. Причинами виникнення наростів на зв'язці:

- а) недостатній об'єм зазору між зв'язкою і деталлю;
- б) порушення умов ковзання стружки по зв'язці.

Необхідна умова відсутності наростів - нормальне введення МОР на всю глибину підбрускового простору.

1.4.5 Якість обробки деталей

До характеристик якості відносять мікрогеометрію поверхні, точність форми й фізико-механічний стан поверхневого шару обробленої деталі.

Теоретичні дослідження процесу формування мікрогеометрії деталі при абразивній обробці були розглянуті вище. Експериментальні дані, отримані багатьма авторами, показують, що при хонінгуванні підвищення зернистості, питомого тиску, пластичності оброблюваного матеріалу, а також зниження в'язкості МОР веде до збільшення висоти мікронерівностей. Окружна швидкість залежно від умов обробки може підвищувати або знижувати шорсткість, у той час, як осьова швидкість завжди підвищує її.

Виправлення погрішності форми деталей залежить, в основному, від твердості деталі й хонголівки, ріжучих властивостей брусків, способу кріплення деталі й інструмента, величини виходу хонголівки.

У результаті процесу різання в поверхневому шарі деталі виникає наклеп і залишкові напруги. Встановлено, що структурні перетворення в металі при алмазному хонінгуванні не спостерігаються, тому що температура різання не перевищує температуру відпустки основного металу, але при абразивному хонінгуванні твердість поверхневого шару трохи знижується. Залишкові напруги після хонінгування носять стискаючий характер, що сприятливо відбивається на працездатності деталей.

Абразивні бруски створюють значно більші залишкові напруги, в порівнянні з алмазними.

1.5 Способи підвищення якості обробленої поверхні при хонінгуванні й зниження зношування абразивного інструмента

Хонінгування знайшло застосування в тракторній, нафтовій, автомобільній, сільськогосподарській, авіаційній промисловості, і інших галузях машинобудування при обробці деталей із пластмас і кольорових металів, кераміки, чавуну, сталі.

Але процес хонінгування не дає повною мірою використовувати ріжучі властивості окремо взятого абразивного зерна, що у свою чергу піднімає такі проблеми, як недостатньо висока якість оброблюваної поверхні, інтенсивне зношування абразивного інструмента. На сьогоднішній день існує кілька варіантів розв'язку виниклих утруднень:

1. Усе частіше в машинобудуванні застосовуються абразивні інструменти зі зміненою структурою, що дозволяє підвищити результати процесу обробки.

Учені Оробинський У. М. і Полянчиков Ю. Н. [18, 19, 20, 21], пропонують застосовувати однокомпонентний абразивний інструмент без зв'язки. Одержання методом формоутворення абразивного порошку при статичному й динамічному навантаженнях ударною хвилею з наступним спіканням з білого електрокорунду. Завдяки тому, що в їхній структурі відсутня м'яка зв'язка, це дозволяє знизити зношування хонінгувальних брусків.

Але абразивний інструмент не верішує істотного поліпшення якості обробленої поверхні, через збіг рисок — подряпин на попередньому й наступному ході хонінгувальної головки.

Бабичев А. П. і Тамаркін М, А. [22, 23] пропонують використання суміші з бісерного полімеру (органічне скло), як з'єднання й мономера, метилметакрилату, у якості затверджувача використовують диметиланілін. Отриманий даним способом інструмент має високу зносостійкість, тому що поліметилметакрилат має більш високі міцнісні властивості. А з мономером інструмент має рівномірну пористу структуру сполучного. Тільки застосування полімерних сполучних збільшує ймовірність засолювання абразивних гранул. Це призводить до зниження точності через вплив температур при обробці й викривленню форми виробу. Внаслідок чого відбувається зниження продуктивності обробки.

2. Клімов С. А., Зайцев В. І. [24, 25, 26], Гільдебранд Л. Г. [27] і інші розглядають електрохімічне хонінгування. Один з найпоширеніших методів зводиться до того, що ефект анодного розчинення металу накладається на механічний вплив абразивних брусків.

Розповсюдженою схемою електрохімічного хонінгування є обробка брусками на струмопровідній металевій зв'язці (бакелітової із графітовим наповнювачем). Тільки в цієї схеми є недолік - електроерозійні явища, спостережувані на границі брусків – деталь, через велику поверхню контакту, малої зазор, рівномірну висоту виступаючої частини абразивних зерен.

Через це більш широке застосування одержала схема, де в хонінгувальній головці спеціально встановлені катоди з діелектричними абразивними брусками (рис. 1.5). Висока вартість і складність устаткування, яке приводить до додаткових енерговитрат, що підвищує собівартість виробу.

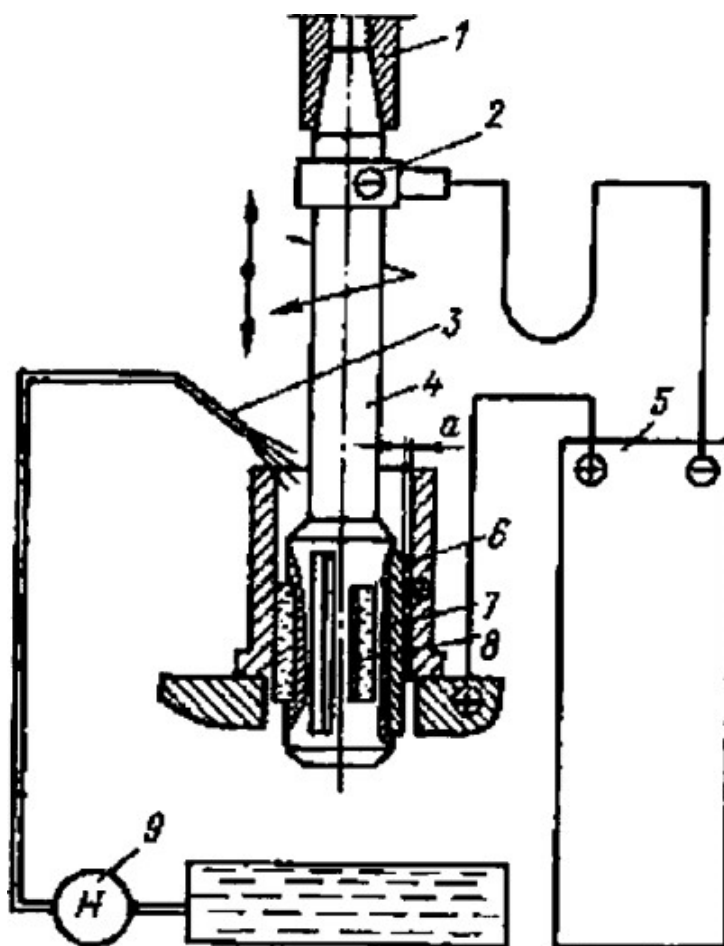


Рисунок 1.5 – Схема електрохімічного хонінгування:

- 1 - шпиндель; 2 - струмознімач; 3 - трубопровід підведення електроліту; 4 - хонінгувальна головка; 5 - генератор; 6 - деталь; 7 - катод;
8 - брусок; 9 – насос

3. Куликів С.І. і Ризванов Ф.Ф. [28] розглядають види осциляції інструмента при обробці хонінгуванням. За результатами досліджень отримано, що при введенні додаткових осцилюючих рухів можна досягти підвищення точності геометричної форми отворів, знизити шорсткість поверхні й збільшити продуктивність. При виборі параметрів режиму обробки процес має незатухаючий характер, і дозволяє не повторювати траєкторію руху попереднього ріжучого зерна. Осцилюючі рухи в основному накладаються на обертальний і зворотно-поступальний рух хонінгувальної голівки.

Кращі результати обробки виходять при односпрямованих траєкторіях руху ріжучих зерен, що при наявності осьової осциляції нездійсненне. Умовою одержання такої траєкторії при кутовій осциляції за синусоїдальним законом є наступна нерівність:

$$\lambda \cdot \beta \leq \frac{n}{\pi}, \quad (1.14)$$

де λ – частота осциляції;

β - подвоєна амплітуда кутової осциляції (в обертах);

n - частота обертання шпинделя, об/с.

Але при використанні даного методу виникають так само негативні явища. До них можна віднести, що кожна грань абразивного зерна періодично бере участь у зніманні металу, що може викликати погіршення ріжучих властивостей абразивного зерна. Що приводить до небажаного зношування інструмента. Додатково з'являються енерговитрати на переміщення інертних частин верстата з великою частотою осциляції.

4. Учений Чирков Г. В. [29, 30, 31, 32] вирішив проводити фінішну обробку отворів за допомогою спеціальної хонінгувальної головки (рис. 1.6).

Це дозволяє лише підвищити якість обробленої поверхні, при цьому відбувається збіг рисок - подряпин, що погіршує ріжучі властивості абразивного зерна. У свою чергу збільшує зношування інструмента.

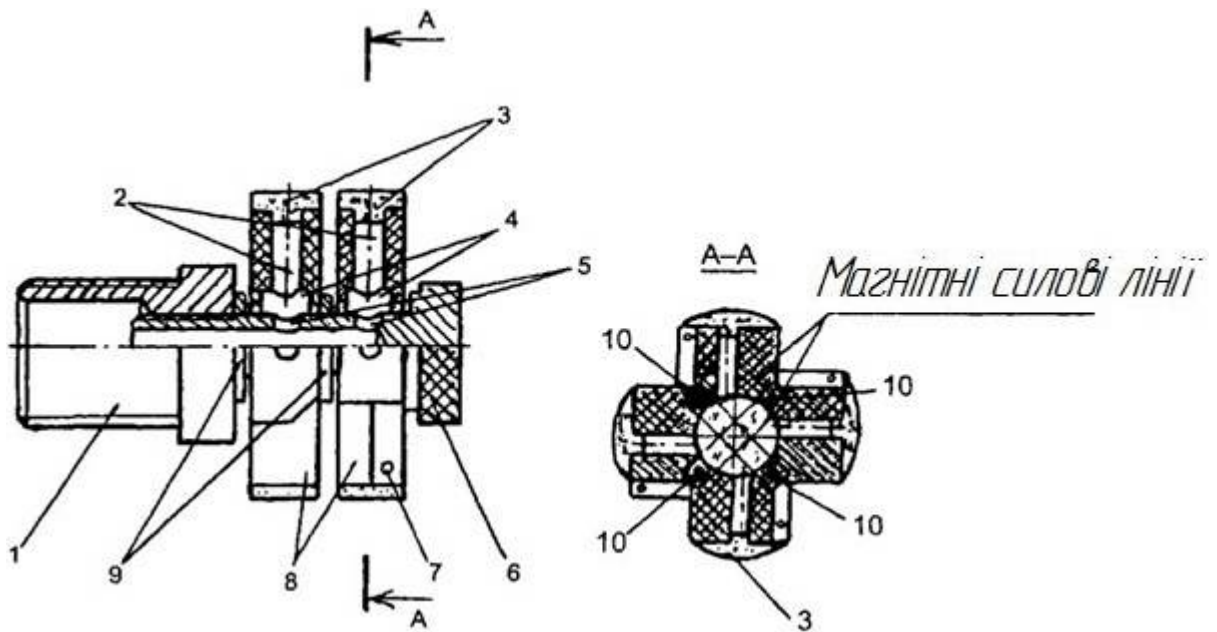


Рисунок 1.6 – Хонінгувальна головка з накладенням магнітного поля:
 1- корпус, 2 – радіальний канал, 3 – абразивні бруски, 4 – кільцеві канавки,
 5 - випускні канали, 6- розпилювач, 7- вихідні канали, 8 – втулка,
 9 – прокладка, 10 – магніт

5. Степанов Ю. С. і Афонасьєв Б. І. [33, 34, 35] вирішили в якості абразивних інструментів використовувати кільця з нанесеним абразивним шаром (рис. 1.7).

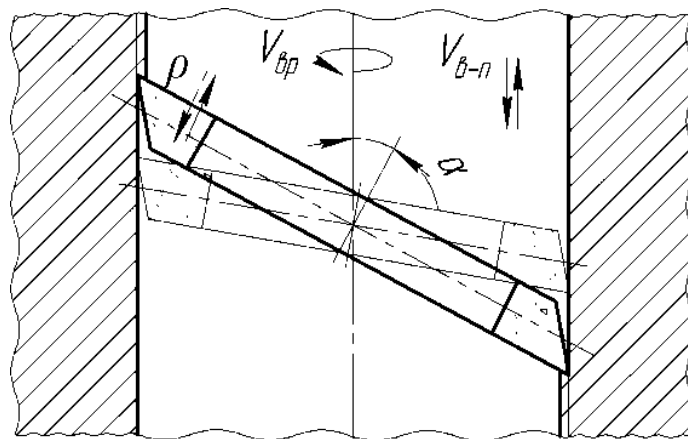


Рисунок 1.7 – Схема обробки абразивними хонінгувальними кільцями:
 $V_{вп}$ – швидкість обертання, $V_{в-п}$ – швидкість зворотно-поступального руху

Особливості способу полягають у використанні хонінгувальної головки з похилою відносно поздовжньої вісі робочою поверхнею абразивних хонінгувальних кілець, що забезпечує поліпшення відводу стружки й подачу мастильно-охолоджуючого технологічного середовища.

Позитивним ефектом є підвищення якості й продуктивності при обробці отворів. Але й у цьому випадку присутні негативні моменти, а саме складність і висока вартість абразивного інструмента. З'являється збільшене зношування інструмента, тому що площа контакту інструмента й оброблюваної поверхні мала. Є ймовірність заклинювання інструмента з наступною поломкою коштовного абразивного інструмента.

6. Бабаев С. Г. [36] пропонує застосовувати елементи циліндричної форми як абразивного інструмента з додатковим примусовим зворотно-обертальним рухом навколо своєї осі. Основним негативним моментом цього способу є сама конструкція хонінгувальної голівки. Вона містить велику кількість додаткових пристроїв і елементів, що підвищує вартість хонінгувальної голівки й знижує надійність її роботи. Поліпшення якості поверхні компенсується зменшенням продуктивності й збільшує зношування інструмента.

7. Оробинский У. М. і Полянчиков Ю. Н. [37] розробили нову хонінгувальну голівку зі зсувом абразивних брусків наприкінці ходу (рис. 1.8).

У результаті осьове переміщення колодок з абразивними брусками, що забезпечує можливість виключити влучення ріжучого зерна в попередньо прорізану їм же різку-подряпину, значно поліпшує якість обробленої поверхні й виключає появу на обробленій поверхні глибоких рисок.

Тільки в процесі хонінгування спостерігається негативний момент, а саме: грані кожного абразивного зерна періодично беруть участь у процесі різання, що приводить до погіршення ріжучих властивостей інструмента. Так само спостерігається зниження якості оброблюваної поверхні, через утворення уздовж різки - подряпини напливів металу із двох сторін видавленого абразивним зерном.

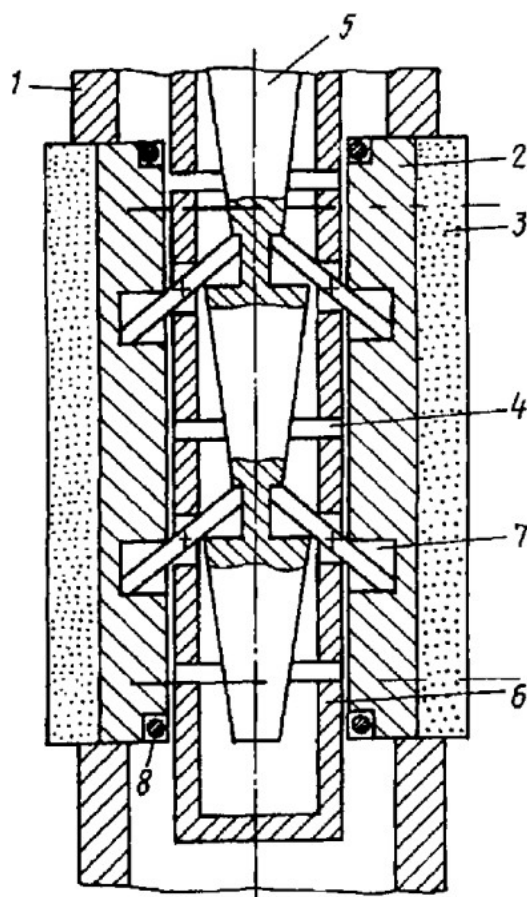


Рисунок 1.8 – Хонінгувальна головка зі зсувом абразивних брусків (в осьовому напрямку):

1- корпус, 2 – несучі колодки, 3 – абразивні бруски, 4-розтискні елементи, 5 – розтискний шток, 6- склянка, 7 – поворотні планки, 8 – пружина

8. Брискин В. Д. і Фрагин І. Е. [38] пропонують періодичне виходжування в процесі хонінгування. Для цього розроблена прогресивна хонінгувальна головка (рис. 1.9), що складається з корпусу з пазами й механізмом імпульсної подачі 2, абразивних брусків 1, які мають взаємодію з голкою роз тискання, пружинними кільцями 3. Бічні стінки корпусу й абразивних брусків виконані конусоподібно під кутом α , в осьовому напрямку, так само покриті антифрикційним матеріалом.

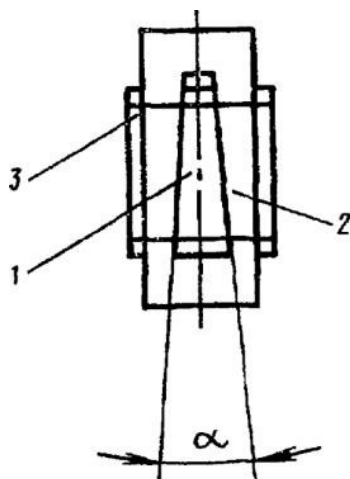


Рисунок 1.9 - Хонінгувальна головка з можливістю заклинювання абразивних брусків:

1 – абразивні бруски, 2 – корпус, 3 – пружинні кільця

Негативним моментом можна вважати, що абразивні зерна працюють в одному напрямку, що збільшує зношування інструмента й знижує ріжучі властивості.

9. Учені Павлиський В. М. і Трипільський Л. Р. [39] вирішили застосовувати два комплекти брусків з різним зусиллям притиску. Метод полягає у використанні брусків, що послідовно чергуються, однакової зернистості, але при цьому, що одержують різне зусилля притиску до оброблюваної поверхні. Крім цього, бруски однієї групи впливають на оброблювану поверхню з постійним зусиллям притиску, у той час як інша група робить відносне стрибкоподібне переміщення в радіальному напрямку, при цьому зусилля притиску - імпульсні.

Це приводить до зменшення продуктивності процесу, тому що в результаті переривчастого різання знижується час контакту абразивного інструмента з поверхнею.

10. Закордонні вчені так само прагнуть підвищити продуктивність операції хонінгування. Так Яіємузу Бі Таіра й Гаї Еичи Камаікеру [40], учені Японії, пропонують вести паралельну обробку поверхні елементами з ущільненої пластмасової мононитки. Для цього розроблена нова хонінгувальна головка

(рис.1.10).

Результат зводиться до того, щоб в процесі очищати оброблювану поверхню від продуктів хонінгування (абразивні зерна, що відпали, металева стружка), що може привести до небажаного царапання поверхні в процесі обробки.

Основним негативним моментом є тимчасові витрати на заміну елементів із пластмасової мононитки, які швидко зношуються в процесі обробки й додаткові фінансові витрати на покупку, що приводить до росту собівартість готового виробу.

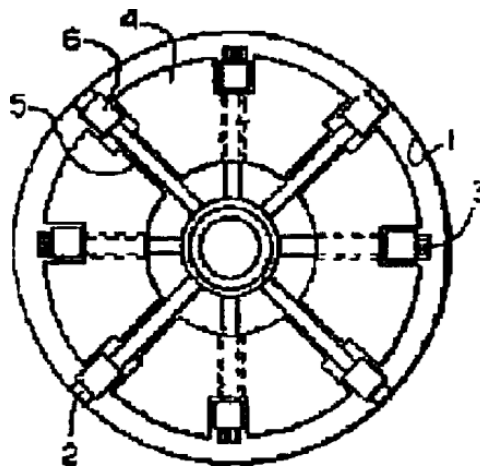


Рисунок 1.10 - Хонінгувальна головка з елементи із пластмасової мононитки:

1 – деталь, 2 - абразивні бруски, 3 - пластмасові мононитки, 4 - корпус,
5 - шток, 6-державка)

11. Чистяков А. В. і Бутенко В. І. [15] пропонують застосування мастильно - охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) певної температури. У цьому випадку хонголівка настроюється на оброблюваний розмір і закріплюється, потім передаються зворотньо-поступальний і обертовий руху. Далі перед обробкою деталь нагрівають до температури t_d , діаметр оброблюваного отвору збільшується до необхідного розміру. Так у процесі обробки відбувається охолодження деталі мастильно - охолоджуючим технологічним середовищем (МОТС), що зменшує діаметр отвору. Температура МОТС східчасто знижується наприкінці подвійного ходу

хонголівки. Це пов'язане з умовою зменшення розміру отвору на величину припуску, який знімає абразивний інструмент за один подвійний хід. Початкову температуру МОТС ($t_{\text{МОТС}}$) вибирають за умови:

$$t_{\text{МОТС}} = (1,2 - 1,4) \cdot t_{\text{Дв}}. \quad (1.15)$$

У результаті деталь охолоджують до температури навколишнього середовища до кінця процесу обробки.

Основний недолік методу укладений у тому, що затрачається велика кількість енергії на нагрівання заготовки перед обробкою й нагрівання СОТС до певної температури. Це приводить до росту собівартості обробки. Також може з'явитися погрішність форми поверхні, через те, що не враховується зношування абразивного інструмента, який може бути нерівномірним при зменшенні діаметра отвору деталі охолодженням на величину припуску.

12. Шумячер В. М. [41, 42] і інші, розглядають застосування нових мастильно-охолоджуючих рідин і вплив складу зокрема на процес обробки. Новий склад МОТС дає можливість поліпшити якість обробленої поверхні, знизити зношування абразивного інструмента при хонінгуванні й підвищити продуктивність процесу обробки.

Тільки застосування нових МОТС не дає значних результатів. Це пов'язане з тим, що при хонінгуванні, у більшій частині, відбувається збіг рисок - подряпин на попередньому й наступному ході хонінгуваної головки. Це погіршує якість обробленої поверхні.

13. Емельяненко А. А. [43], Полянчиков Ю. Н. [44], Адлер Ю. П. [45] пропонують оптимізацію режимів різання при хонінгуванні. Це належить до традиційних способів підвищення якості обробленої поверхні. Можна досягти високих результатів процесу хонінгування при вірному доборі режимів обробки за відомими методиками.

Тільки одержати кращий результат процесу обробки методом добору режимів різання не завжди виходить. Так, для зменшення шорсткості поверхні, необхідно знижувати продуктивність обробки. Тому потрібно створювати нові

прогресивні методи обробки для підвищення конкурентоспроможності продукції в сучасному машинобудуванні.

14. Учені Гринглаз Л. А. і Алімов С. П. [46], Ризванов Ф. Ф., Куліков С. І., Романчук В. А. [28, 47], займаються хонінгуванням зі змінною швидкістю різання. Змінювати швидкість обертання й швидкість зворотно-поступального руху хонінгувальної головки за синусоїдальним законом пропонують Куліков С.І. і Ризванов Ф. Ф.

У якості основних робочих рухів різання узяті осьові синусоїдальні 4 і обертальні 3 коливання, а також обертальний 1 і зворотно - поступальний 2 рухи з круговою і осьовою подачами інструмента.

При такій кінематиці хонінгування утворюється растрова траєкторія руху зерен у вигляді фігур Ліссажу (рис.1.11) параметрів, що утворюють при правильному доборі, густу сітку слідів обробки. Рівномірний розподіл сіток по всій оброблюваній поверхні забезпечується за рахунок кругової і осьової подач.

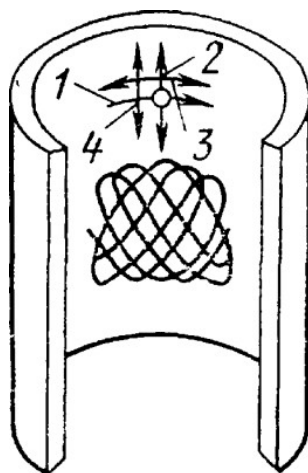


Рисунок 1.11 - Траєкторії руху ріжучих зерен при зміні швидкості обертання й швидкості зворотно-поступального руху по синусоїдальному закону:

- 1 - обертаний рух, 2 - зворотно-поступальний рух, 3 - обертальні коливання, 4 - синусоїдальні осьові коливання

При таких переміщеннях немає збігів траєкторій зерен з іншим зерном, це дає можливість на повну силу використовувати ріжучу здатність абразивних

брусків. Суттєво підвищує якість оброблюваної поверхні й збільшує продуктивність знімання металу.

1.6 Мета та задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення операції хонінгування з переривчастою робочою поверхнею алмазного інструмента.

Для досягнення поставленої мети в роботі були сформульовані наступні завдання:

1. Математично описати мікрогеометрію хонінгувальних абразивних брусків і експериментально-розрахункову методику її дослідження.
2. Визначити параметри лінійних моделей процесу хонінгування з використанням методики повного факторного експерименту ПФЕ 2ⁿ.
3. Експериментально дослідити процес хонінгування з переривчастою робочою поверхнею алмазного інструмента на прикладі чавунних гільз ДВС.
4. Обґрунтувати доцільність зменшення площі суцільного контакту брусків з деталлю шляхом нанесення канавок на робочу поверхні інструмента.

2 МІКРОГЕОМЕТРІЯ ХОНІНГУВАЛЬНИХ БРУСКІВ І МЕТОДИКА ЇЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз літератури показав, що найбільш перспективні дві моделі мікрогеометрії абразивних інструментів - дискретна й безперервна. Але дискретна більш реально відбиває будова інструмента, але при цьому, має труднощів в експериментальному визначенні її характеристик.

Математичне вивчення цих моделей і знаходження взаємозв'язки між ними дозволить глибше зрозуміти закономірності будови й роботи абразивних інструментів.

Для визначення параметрів форми вершин абразивних зерен і розподілу їх по висоті, ми застосували експериментально-розрахункову методику, яка заснована на профілографуванні подряпин, нанесених даним інструментом на полірований зразок. На основі методу дряпання також визначені пружні деформації й вдавнення окремих зерен у зв'язування при абразивній обробці. Для цього на зразку виконувалися ділянки з матеріалу низької твердості, що приводило до зміни глибини подряпин на величину пружних деформацій при переході зерна із твердого матеріалу на м'який.

Експериментальні дослідження із запропонованої методики проводилися на алмазних хонінговальних брусках з металевим зв'язуванням.

2.1 Математичний опис мікрогеометрії абразивно-алмазних інструментів

Закономірності роботи абразивних інструментів багато в чому визначаються такими геометричними параметрами, як сумарні площі S_0 і S_p передніх поверхонь зерен на основну площину (0) і площина різання (P) і середнього значення переднього кута зерен γ (рис 2.1).

Зазначені величини залежать як від форми вершин зерен, так і від закону розподілу їх по висоті, тому на різних рівнях H ріжучого шару їх значення міняються.

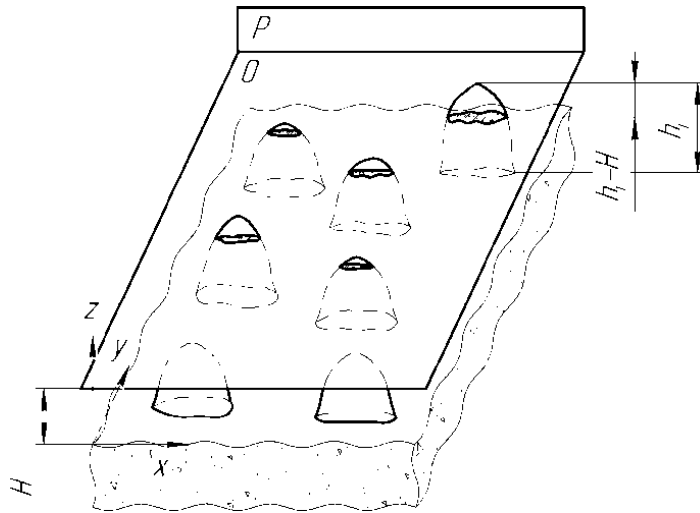


Рисунок 2.1 - Схема ріжучого шару абразивного інструмента

Виразимо $S_0(H)$, $SP(H)$, $\gamma(H)$ через характеристики дискретної моделі інструмента, які задамо функцією $z(x)$, що описує усереднений профіль вершин зерен, і об'ємною щільністю $n(h)$ розподілу вершин по висоті h ріжучого шару, рівної числу вершин в одиниці об'єму на заданому рівні. Рис. 2.1. показана ділянка поверхні інструмента одиничної площі, причому основна площина проведена на висоті H .

Видне, що

$$S_0(H) = \frac{1}{2} \int_H^\infty \overline{S_0} (h - H) \cdot n(h) \cdot dh, \quad (2.1)$$

$$Sp(H) = \int_H^\infty \overline{S_p} (h - H) \cdot n(h) \cdot dh, \quad (2.2)$$

де $\overline{S_0}(h), \overline{S_p}(h)$ математичне позначення горизонтального й вертикального перетинів зерна на висоті h від його вершини,

$\frac{1}{2}$ -множник, що враховує те, що передня поверхня становить половину вершини зерна. Середнє значення переднього кута можна знайти зі співвідношення площі проєкцій:

$$\gamma(H) = -\arctg \frac{S_0(H)}{S_p(H)}. \quad (2.3)$$

Площі проєкцій обчислимо виходячи з радіуса $r(h)$ зерна в перетині h , що є випадковою функцією полярного кута φ .

$$\overline{S_0}(h) = M \left\{ \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} r^2(h) \cdot d\varphi \right\} = \pi \cdot [R^2(h) + \delta_R^2(h)], \quad (2.4)$$

$$\overline{S_p}(h) = M \left\{ 2 \int_0^h r(h) \cdot dh \right\} = 2 \int_0^h R(h) \cdot dh, \quad (2.5)$$

де $M\{\dots\}$ - операція знаходження математичного очікування;

$R(h)$ - математичне очікування радіуса перетину зерна, причомує зворотною функцією до $z(x)$;

$\delta_R^2(h)$ - дисперсія радіуса.

Оскільки діаметральний розмір перетину виміряти значно легше, чим радіус, замінимо радіальні характеристики через відповідні діаметральні (причому враховуємо, що кореляція між протилежними радіусами близька до одиниці).

$$\overline{S_0}(h) = \frac{\pi}{4} [D^2(h) + \delta_D^2(h)] = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2)}{4} \cdot D^2(h), \quad (2.6)$$

$$\overline{S_p}(h) = \int_0^h D(h) \cdot dh, \quad (2.7)$$

де для зручності введений коефіцієнт варіації розміру зерна:

$$k_v = \frac{\delta_D(h)}{D(h)}.$$

Як показують дослідження, коефіцієнт варіації k_v і визначається, в основному, зернистістю й може вважатися постійним на всіх рівнях. На основі даних роботи [150] були розраховані коефіцієнти варіації середнього діаметра для ряду зернистостей. (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт варіації k_v середнього розміру алмазних зерен

Марка зерна	АС 6	АС 10	АС 25
k_v	0.155	0.170	0.243

Враховуючи сказане, одержимо:

$$S_0(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2)}{8} \int_0^\infty D^2(z) \cdot n(H+z) \cdot dz, \quad (2.8)$$

$$S_p(H) = \int_0^\infty n(z+H) \cdot \left\{ \int_0^z D(x) \cdot dx \right\} \cdot dz. \quad (2.9)$$

Використовуючи дискретну модель можна знайти найважливіші характеристики безперервної моделі - закон розподілу висоти нерівностей $E(H)$ і середнє число виступів $\lambda(H)$ на одиницю довжини профілю, що мають висоту більше H .

$$E(H) = 2 \cdot S_0(H), \quad (2.10)$$

$$\lambda(H) = \int_0^\infty D(z) \cdot n(z+H) \cdot dz. \quad (2.11)$$

Для практичного використання отриманих залежностей необхідно задатися конкретним видом функція $D(h)$ і $n(h)$. С достатньою точністю можна прийняти статичну апроксимацію:

$$D(h) = \frac{2}{c^m} \cdot h^m, n(h) = \begin{cases} k \cdot h^\beta \text{ при } h > 0 \\ 0 \text{ при } h \leq 0 \end{cases}. \quad (2.12)$$

Тоді, побравши за початок відліку вершину найбільш високого зерна й направивши вісь у тіло інструмента, одержимо:

$$S_0(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(2m+1)}{2 \cdot c^{2m} \cdot \Gamma(\beta+2m+2)} \cdot H^{\beta+2m+1}, \quad (2.13)$$

$$S_p(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(m+1)}{c^m \cdot \Gamma(\beta+m+3)} \cdot H^{\beta+m+2}, \quad (2.14)$$

$$\gamma(H) = -\arctg \left[\frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot \Gamma(2m+1) \cdot \Gamma(\beta+m+3)}{4 \cdot c^m \cdot \Gamma(\beta+2m+2) \cdot \Gamma(m+1)} \cdot H^{m-1} \right], \quad (2.15)$$

$$\gamma(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)}{c^m \cdot \Gamma(\beta+m+2)} H^{\beta+2m+1}, \quad (2.16)$$

$$E(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(2m+1)}{c^{2m} \cdot \Gamma(\beta+2m+2)} \cdot H^{\beta+2m+1}, \quad (2.17)$$

де $\Gamma(x=1)$ - гамма-функція, значення якої береться з таблиць [148].

Ці формули показують взаємозв'язок дискретному й безперервної моделей абразивного інструмента, дають можливість розрахувати ряд важливих кількісних характеристик, а також зробити деякі висновки про його працездатність абразивного інструмента.

Зі збільшенням глибини впровадження H зростає як площа контакту S_0 бруска з деталлю, так і площа зрізу S_p , яке збільшується більшою мірою. У

зв'язку із цим зменшується негативний передній кут γ , що полегшує процес різання й зменшує частку пластичних деформацій. При конічній формі зерен ($m=1$) кут γ не залежить від глибини впровадження й визначається тільки значенням коефіцієнта C .

Зростання зернистості брусків веде до зменшення параметрів k і C , причому k змінюється більшою мірою, чому C . У зв'язку із цим, для досягнення необхідної площі зрізу грубозернистими брусками й зниження негативного кута γ потрібна значно більша глибина впровадження, чому для дрібнозернистих брусків.

2.2 Теоретичне обґрунтування методики дослідження мікрогеометрії абразивних інструментів

Високою точністю характеризується метод дослідження форми профілю вершин зерен, заснований на дряпанні абразивним інструментом полірованих зразків. Однак через кривизну поверхні інструмента глибина подряпин відрізняється від висоти виступу зерен (рис. 2.2) і тому даний метод не дозволяє безпосередньо виміряти розподіл зерен по висоті й для цієї мети не застосовується.

Якщо встановити математичну залежність між законами розселення висоти зерен і глибини подряпин, то з'явиться можливість шляхом дряпання зразків і наступного профілографування їх поверхні з достатньою точністю знаходити як параметри форми профілю зерен, так і закон розподілу їх по висоті.

Для висновку розрахункових залежностей розглянемо схему нанесення подряпин на зразок (рис. 2.2), який може бути циліндричним або плоским ($R_0 = \infty$).

Нехай рівні відліку висоти зерен (1-1) і глибини подряпин (2-2) у центральному перетині O збігаються, а напрямок відліку прийняли в тіло інструмента.

За рахунок кривизни поверхонь інструмента й зразка глибина подряпини залишеної деяким зерном, зменшується на величину відстані x зерна до центрального перетину 0. (x), щозалежить

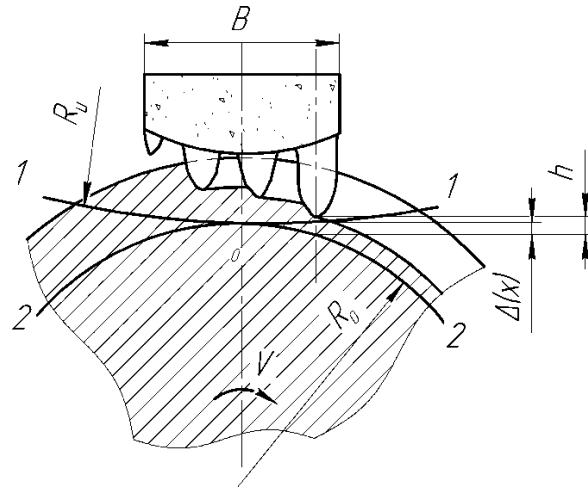


Рисунок 2.2 - Схема дряпання зразка

Тому щільність розподілу висоти зерен щодо рівня відліку глибини подряпин (окружність 2-2) буде:

$$n(h) = \int_{-\infty}^{\infty} n[h - \Delta(x)] \cdot dx, \quad (2.18)$$

де $n(h)$ – щільність розподілу зерен по висоті.

Частина подряпин може перекриватися, через що щільність розподілу глибини подряпин $n_u(h)$ буде менше, чим (2.18)

$$n_u(h) = P(h) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} n(h - \Delta(x)) \cdot dx, \quad (2.19)$$

де $P(h)$ - відносна опорна довжина профілю зразка після дряпання, рівна відношенню сумарної довжини виступів на рівні h до загальної довжини профілограми.

Через малість дуги контакту інструмента зі зразком:

$$\Delta(x) \approx \frac{x^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{R_0} \right) = \frac{x^2}{2 \cdot R_{np}}, \quad (2.20)$$

де R_0 , R_u – радіус зразка й інструмента.

R_{np} – наведений радіус.

Позначимо відносини $n_u(h)$ до $P(h)$ через $\eta(h)$ – щільність розподілу глибини канавок з урахуванням імовірності їх перекриття й запишемо (2.19) у вигляді:

$$n(h) = \frac{n_u(h)}{P(h)} = 2 \cdot \int_0^\infty n \left(h - \frac{x^2}{2R_{np}} \right) \cdot dx = \sqrt{2 \cdot R_{np}} \cdot \int_{-\infty}^h \frac{n(z)}{\sqrt{h-z}} \cdot dz . \quad (2.21)$$

Отримане інтегральне рівняння, відоме в математиці як рівняння Абеля, зв'язує шукане розподілення з функцією, значення якої легко розрахувати за профілограммою.

Точне рішення цього рівняння описується формулою:

$$n(h) = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot R_{np}}} \cdot \frac{d}{dh} \cdot \int_{-\infty}^h \frac{\eta(z)}{\sqrt{h-z}} dz . \quad (2.22)$$

Однак безпосередня підстановка в (2.22) експериментальних значень функції $\eta(h)$ може не дати бажаних результатів. Для одержання стійкого розв'язку необхідно експериментальне значення $\eta(h)$ попередньо апроксимувати певними аналітичними вираженнями, після чого можна використовувати формулу (2.22).

Чисельний метод розв'язку рівняння Абеля з використанням ортогональних поліномів [36] застосуємо до будь-якого виду функцій $\eta(h)$. Однак, якщо апроксимувати початкова ділянка $\eta(h)$ статечною залежністю, то розв'язок значний спрощується.

Нехай

$$n(h) = \begin{cases} k_n \cdot h^{\beta_n} & \text{при } h > 0 \\ 0 & \text{при } h \leq 0 \end{cases} , \quad (2.23)$$

тоді шукана щільність розподілу зерен по висоті:

$$n(h) = \begin{cases} \frac{k_n \cdot \Gamma(\beta_n + 1)}{2\pi R_{np} \cdot \Gamma(\beta_n + 0.5)} & \text{при } h > 0 \\ 0 & \text{при } h \leq 0 \end{cases} . \quad (2.24)$$

Стає цікавим так само розглянути випадок, коли поверхні досліджуваного інструмента й зразка прилягають, тобто коли

$$\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_u} = 0.$$

Якщо над деяким перетином зразка при дряпанні пройшла ділянка інструмента довжиною L , то замість(3.19)маєм

$$n_y(h) = P(h) \cdot L \cdot n(h), \quad (2.25)$$

звідки відразу одержимо $n(h) = \frac{n_y(h)}{L \cdot P(h)}$.

Отже, залежності (2.22-2.25) дають можливість знайти розподіл зерен по висоті виходячи із двох характеристик профілограми дряпаного зразка $n_y(h)$ і $P(h)$.

Профіль подряпин на зразку відповідає поперечному профілю вершин абразивних зерен. Однак заокругленість вершини голки профілографа приводить до деякої зміни форми профілограми. Якщо радіус вершин зерен r_z значно більше радіуса голки r_u , то ці зміни не істотні. У випадку, коли радіуси порівнянні по величині, але $r_z > r_u$ погрішність, що виникає, можна врахувати розрахунковим шляхом.

Нехай рівняння западини по профілограмі $z_n = z_n(x_n)$, тоді дійсний профіль подряпин знайдемо по формулах, які виведені за допомогою простих геометричних побудов.

$$\begin{cases} x = x_n + \frac{r_u \cdot z'_n(x_n)}{\sqrt{1+(z'_n(x_n))^2}} \\ z = z_n(x_n) - \frac{r_u}{\sqrt{1+(z'_n(x_n))^2}} + r_u \end{cases}, \quad (2.26)$$

де

$$z'_n(x_n) = \frac{dz_n(x_n)}{dx_n} - \text{похідна.}$$

Якщо $r_z < r_u$, то голка не поміститься в западину на зразку, корисна інформація губиться й не може бути повністю відновлена розрахунками. Тому слід використовувати профілограф з можливо меншим радіусом голки.

2.3 Методика виміру пружних деформацій інструмента

У процесі хонінговання абразивні зерна під дією сил різання пружно вдавлюється у зв'язування, що змінює глибину впровадження зерен у метал і

може значно впливати на показники обробки.

Згідно з методом, використаним при дослідженні, на поверхні плоского або круглого зразка з оброблюваного матеріалу прорізається вузький паз, розташований під кутом до напрямку дряпання. Паз заповнюється м'яким матеріалом (наприклад, сплавом свинцю з оловом), а потім зразок доводить до високого ступеня точності й чистоти.

Досліджуваний інструмент за допомогою спеціального пристосування притискається з постійним зусиллям до зразка й проводиться дряпання.

Поки абразивне зерно рухається по твердому матеріалу воно пружно деформоване й втиснене у зв'язування. При переході на м'який матеріал висота зерна відновлюється, що приводить до збільшення глибини подряпини. З ділянок різної твердості знімають профілограми (уздовж паза). Заміливши різницю глибини подряпин можна знайти пружні деформації й зіставити їх безпосередньо з розмірами поперечного переріза срізного шару.

Для кількісної оцінки величини пружної деформації зручно ввести коефіцієнт деформації d , що виражає кореляційний зв'язок між величиною пружної деформації δ і площею зрізу S_p .

$$d = \frac{M\{\delta\}}{M\{S_p\}} , \quad (2.27)$$

де $M\{\dots\}$ - математичне очікування.

Цей коефіцієнт комплексно відбиває пружні властивості інструмента й силовий вплив оброблюваного матеріалу, що досить коштовне при математичному аналізі процесу хонінговання.

Запропонований спосіб відрізняється невисокою трудомісткістю, універсальністю - він застосовний до різних видів абразивних інструментів, досить простий у здійсненні, дозволяє проводити статистичний аналіз величини пружних деформацій сукупності зерен.

2.4 Експериментальне дослідження алмазних хонінговальних брусків

З метою практичної перевірки методів і одержання інформації про мікрогеометрію хонінговальних брусків, ми провели експериментальні дослідження алмазних брусків марок АСВ 100/80 М1 50 %, АСВ 125/100 М1 50 %, АС 200/160 М1/Cu 50 % [17] з розмірами алмазного шару $125 \times 12 \times 3$ мм, радіусом R_u 52,5мм.

2.4.1 Устаткування й техніка вимірів

Плоскі зразки для дряпання виготовлялися із чавуну СЧ 25, який відповідає по складу й властивості чавуну, застосовуваному для виготовлення гільз Камаз 740. Розміри зразків $400 \times 700 \times 6$ мм, робоча поверхня шліфувалася, а потім доводилася притиранням до 10 класу чистоти, відхилення від площинності становило не більш 1 мкм.

Підготовка зразка для виміру пружних деформації була трохи іншою. Спочатку на зразку прорізався паз шириною 2 мм, глибиною 3 мм під кутом 300 до поздовжньої осі й робоча поверхня доводила до необхідних параметрів. Потім паз знежирювали й заповнювали розплавленим олов'яно-свинцевим припоєм ПОС-40. Наступна обробка розділялася на два етапи:

а. Чорнове видалення надлишків припою на доводочній плиті алмазною пастою зернистістю 40/28. Для захисту, раніше доведеної поверхні на неї наклеювалися смужки тонкого паперу за допомогою водорозчинного клею.

б. Остаточна обробка для одержання заданої чистоти велася на прецизійній доводочній плиті з поливом гасом без пасти. (попередньо захисний шар паперу видаляли).

Дана технологія доведення, як показали виміру, дає цілком задовільну точність –різна висота ділянок із чавуну й припою не перевищувала 0,8 мкм.

Для підвищення точності визначення пружної деформації зерен після полірування зразків вимірялася фактична висота ділянок м'якого й твердого матеріалів. Ця величина додавалася до різниці глибини подряпин.

Для нанесення подряпин хонінговальним бруском на плоскі зразки

використовувалося спеціальне пристосування до токарського верстата 1E61M, що дозволяє створити притиск бруска до зразка із зусиллям 10 МПа й рух зразка швидкістю до 0,15 м/с.

При вимірі мікрогеометрії за допомогою одного зразка можна впливати 5-7 брусків, при вимірі пружних деформацій - тільки один брусок. Для запису профілю подряпин застосовувався профілометр Surftest SJ-210.

Перед вимірами, згідно з інструкцією приладу, проводили тарировку. Швидкість руху датчика ухвалювалася постійної при всіх вимірах $V_{\text{датч}} = 1$ мм/хв.

При русі голки профілографа по м'яких матеріалах виникає небезпека мікрорізання й, отже, викривлення вимірюваного профілю. Тому перед профілограміруванням, з поверхні зразка, що має паз, залити свинцем припі, зніма реплік за допомогою пластмаси, що самотвердіє, "Протакрилл" [19].

Як показало порівняння профілограм, записаних з реплік і безпосередньо зі зразків, розбіжність між ними незначно, тому частина вимірів була проведена без зняття реплік.

2.4.2 Результати експериментальних досліджень пружних деформацій

Обробка профілограм дозволила побудувати графіки (рис. 2.3.), що вказують кореляційну залежність деформації δ від площі зрізу S_p одиничним зерном (у твердому матеріалі).

Як бачимо, зі збільшенням площі зрізу деформації зростають. Одержання в окремих випадках негативних значень деформації, особливо при малих глибинах впровадження зерен, пов'язане з погрішностями вимірів.

Математична обробка експериментальних даних полягала в знаходженні рівняння лінійної регресії й статистичному аналізі вірогідності результатів [115].

$$\delta = d \cdot S_p . \quad (2.28)$$

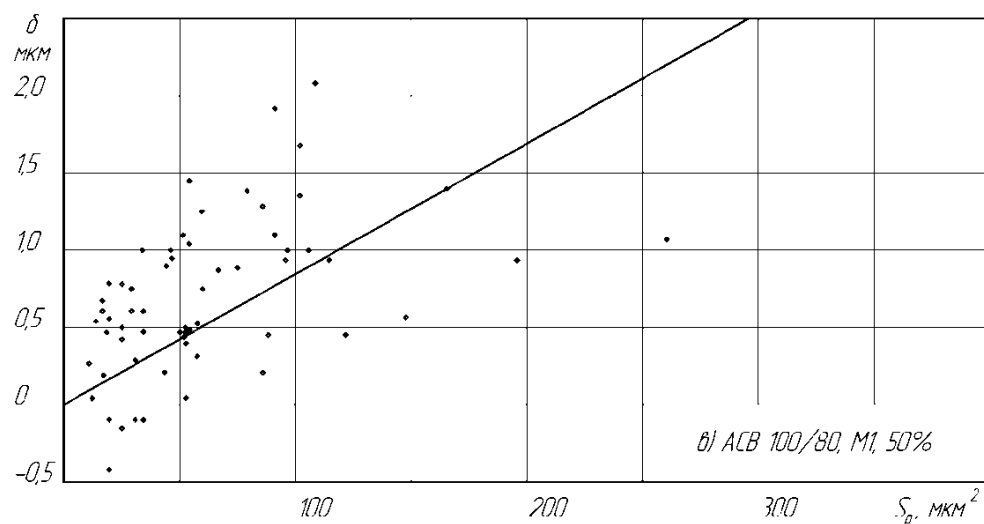
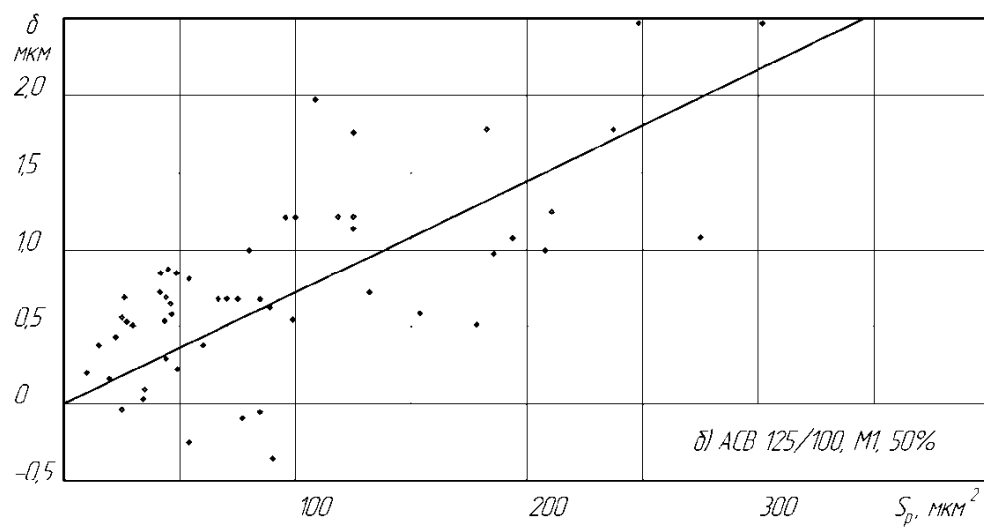
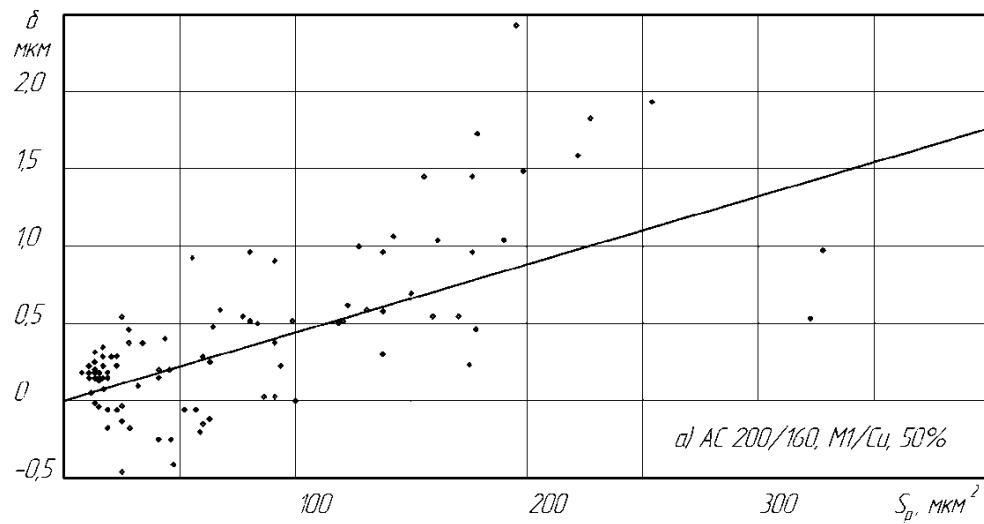


Рисунок 2.3 - Залежність пружної деформації δ від площі зрізу S_p . Для брусків: а) АС 200/160, М1/Сu, 50%; б) АСВ125/100, М1, 50%; в) АСВ 100/80, М1, 50%

Якщо для якої-небудь зернистості $j \in n$ експериментальних крапок, то значення d , перебуває згідно методу найменших квадратів по формулі:

$$d = \frac{\sum_i \delta_i \cdot S_{pi}}{\sum_i S_{pi}^2}. \quad (2.29)$$

Розраховуються також середні значення й дисперсії незалежних змінних:

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \frac{1}{n} \sum_i \delta_i, & \bar{S}_p &= \frac{1}{n} \sum_i S_{pi}, \\ S_{\delta}^2 &= \frac{1}{n} \sum_i (\delta_i - \bar{\delta})^2, & S_{Sp}^2 &= \frac{1}{n} \sum_i (S_{pi} - \bar{S}_p)^2. \end{aligned} \quad (2.30)$$

коефіцієнт кореляції r_k між δ і Sp

$$r_k = \frac{\sum_i \delta_i \cdot S_{pi} - n \cdot \bar{\delta} \cdot \bar{S}_p}{n \cdot S_{\delta} \cdot S_{Sp}}, \quad (2.31)$$

що показує ступінь тісноти й лінійної залежності між змінними.

Кореляція вважається істотною якщо

$$r_k > t_g \cdot \frac{1 - r_k^2}{\sqrt{n}}, \quad (2.32)$$

де t_g - $q\%$ -межа абсолютного нормального відхилення [115], при довірчій імовірності 95%, $t_g = 1.96$.

Дисперсію коефіцієнта d можна оцінити за допомогою вираження

$$S_d = \frac{S_{\delta}}{S_{Sp}} \cdot \frac{1 - r_k^2}{\sqrt{n}}. \quad (2.33)$$

Результати розрахунків по цих формулах зведено в таблицю 2.2, (позиція 1- 10), з якої видно, що кореляція між δ і Sp значна (нерівність 2.32 виконується у всіх випадках).

Розгляд графіків (рис.2.3) і таблиці 2.2 показує, що зі зменшенням зернистості коефіцієнт деформацій d збільшується.

Щоб оцінити вірогідність виявленого впливу зернистості на коефіцієнт d скористаємося критерієм Стьюдента [115].

Таблиця 2.2 - Статистичний аналіз результатів вимірів пружних деформацій

№ п/п	Показатели	Зернистость		
		АС 200/160 МІ/Сu, 50%	АСВ125/100 МІ/Сu, 50%	АСВ 100/80 МІ/Сu, 50%
1.	j	1	2	3
2.	n	83	60	61
3.	δ (мкм)	0.46	0.792	0.702
4.	S_p (мкм ²)	95.6	100.2	65.3
5.	S_δ (мкм)	0.63	0.616	0.506
6.	S_{S_p} (мкм ²)	133.8	72.4	51.7
7.	p_k	0.69	0.74	0.46
8.	$t_q \cdot \frac{(1 - p_k^2)}{\sqrt{n}}$	0.12	0.12	0.19
9.	d (мкм ⁻¹)	0.0047	0.0068	0.0085
10.	S_d (мкм ⁻¹)	0.00039	0.00051	0.00083
11.	t_{jl}	$t_{12} = 3.28$	$t_{23} = 1.75$	$t_{13} = 4.50$
12.	P_{jl}	$P_{12} = 0.0011$	$P_{23} = 0.08$	$P_{13} = 0.0000$
13.	\bar{h} (мкм)	4.1	4.3	3.0
14.	$\frac{d \cdot S_p}{h} \cdot 100(\%)$	11	12	18

Імовірність того, що розбіжності між значеннями d для даної пари зернистостей (j і l) є випадковим, перебуває в такий спосіб

Обчислюємо параметр

$$t_{jl} = \frac{d_j - d_l}{\sqrt{S_{d_j}^2 \cdot n_j + S_{d_l}^2 \cdot n_l}} \sqrt{\frac{n_j \cdot n_l (n_j + n_l - 2)}{n_j + n_l}}, \quad (2.34)$$

потім по таблицях Стьюдента для даного t_{jl} і числа ступенів волі $f = (n_j + n_l - 2)$ визначаємо шукану ймовірність P_{jl} .

Значення параметрів t_{jl} і ймовірностей P_{jl} , наведені в таблиці 2.2 (поз.11-12), показують, що залежність коефіцієнта від зернистості не є випадковою (усі $P_{jl} < 0,1$). Пояснити цю закономірність можна тим, що при збереженні подоби форми зерен і питомого тиску на бруски величина деформації зростає приблизно пропорційно розміру зерна, у той час як площа зрізу зростає більшою мірою. Тому відношення $\frac{\delta}{S_p}$ буває з підвищенням зернистості.

Як впливає з результатів вимірів, пружні деформації при хонінгованні чавуну алмазними брусками на металевих зв'язуваннях невеликі.

Дійсно, якщо побрати відношення розрахункової середньої деформації середній глибині впровадження h зерен у м'який матеріал, те ця величина перебуває в межах 10 - 18 % (таблиця 2.2 поз. 13,14).

Таким чином, при побудові теорії хонінговання для розглянутих умов пружними деформаціями інструмента можна зневажити.

При хонінгованні високоміцних, твердих матеріалів пружні деформації будуть набагато значніше і їх потрібно враховувати.

2.4.3 Результати експериментальних досліджень форми зерен і закону розподілу їх по висоті

Дослідження алмазних хонінговальних брусків марок АС 200/160, М1/Сu, 50%; АС В 125/100, М1, 50%; АСВ 100/80, М1, 50% проводилися по описаній вище методиці із застосуванням плоских зразків із сірого чавуну, що відповідає по складу оброблюваної деталі.

Послідовність обробки профілограм покажемо на прикладі бруска АСВ 125/100, М1, 50%.

а. Усереднений профіль вершин зерен

Спочатку замірялися полуширина $x_{ni}(z_j)$ кожної i -тої канавки в залежності від відстані z_j до її вершини та знаходилось математичне очікування:

$$\bar{x}_n(z_j) = \frac{1}{n} \sum_j x_{nj}(z_j). \quad (2.35)$$

На рис. 2.4 (а,б,в) криві 1 відповідають усередненому профілю канавок по профілограмі, а значками відзначені експериментальні крапки для кожного із трьох брусків.

Вносимо виправлення на радіус голки профілографа r_u - 11 мкм. По формулах (2.26) розраховуємо дійсні значення координат. Наприклад, для крапки з координатами $x_n = 12,0$ мкм і $z_n = 1,45$ мкм (похідна $z'_n = 0.226$) знаходимо:

$$x = 12.0 + \frac{11 \cdot 0.226}{\sqrt{1 + 0.226^2}} = 14.42, (\text{мкм})$$

$$z(x) = 1.45 - \frac{11}{\sqrt{1 + 0.226^2}} + 11 = 1.72, (\text{мкм})$$

Відповідні графіки профілю вершин зерен (рис. 2.4, криві 2) показують, що усереднений профіль вершин зерен близький до кривої параболічного типу. Для знаходження параметрів апроксимуючої параболі

$$z = C \cdot |x|^{\frac{1}{m}}.$$

скористаємося методом найменших квадратів [115].

Логарифмуємо рівняння параболі й відповідно експериментальні значення координат профілю, одержуємо:

$$\begin{cases} \frac{1}{m} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i \lg x_i - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)}{\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2}, \\ \lg C = \frac{1}{n} \sum_i \lg z_i - \frac{1}{m \cdot n} \sum_i \lg x_i \end{cases} \quad (2.36)$$

Для статистичної оцінки точності обчислюємо відхилення розрахункових значень від фактичних:

$$\delta_i = \lg z_i - \left(\lg C + \frac{1}{m} \lg x_i \right), \quad (2.37)$$

і знаходимо середня погрішність коефіцієнтів регресії:

$$\begin{cases} S_{\lg C} = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \delta_i^2}, \\ S_{\frac{1}{m}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \delta_i^2}}{\sqrt{n-2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2}} \end{cases} \quad (2.38)$$

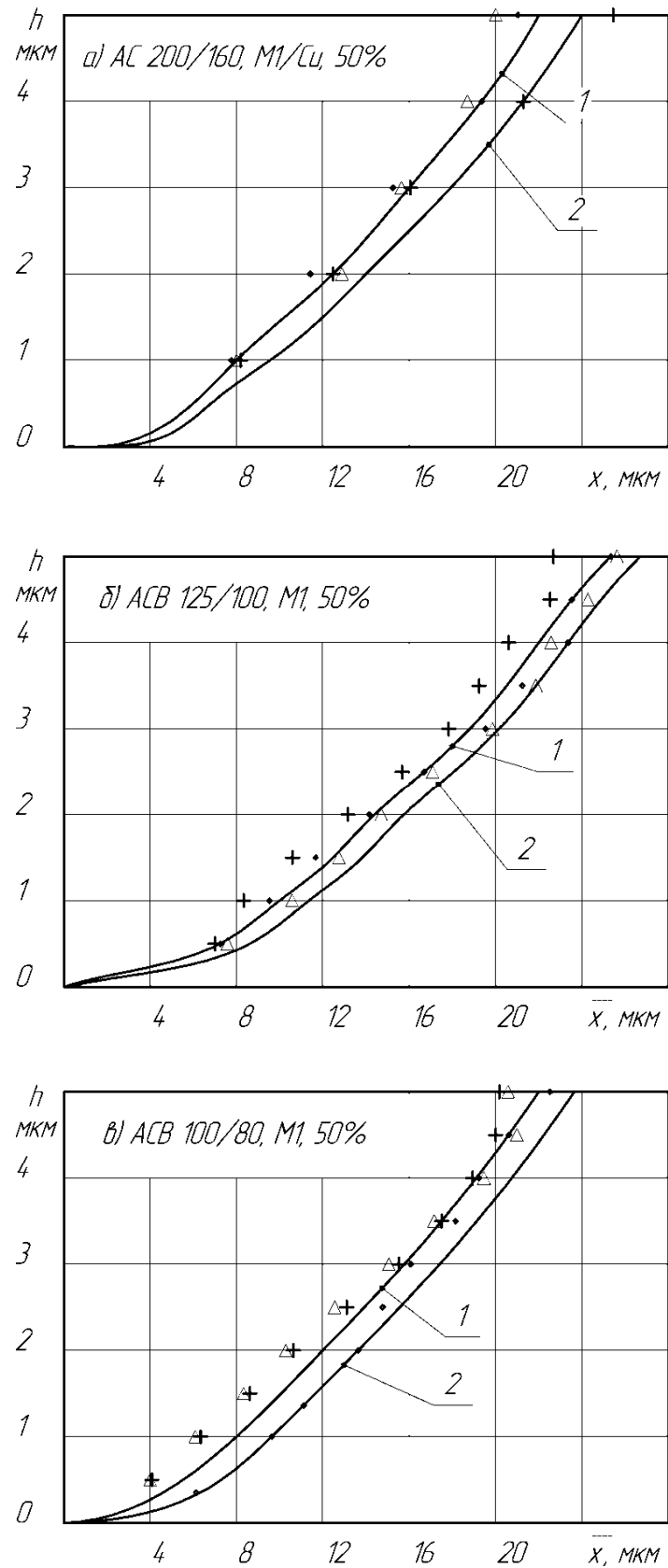


Рисунок 2.4 - Усредненный профиль вершин зерен. (крива 1 – усредненный профиль канавок, крива 2- профиль вершин зерен). Для брусков: а) АС 200/160, М1/Сu, 50%; б) АСВ125/100, М1, 50%; в) АСВ 100/80, М1, 50%

Тепер за допомогою критерію Стьюдента $t_{q,(n-2)}$ визначаємо довірчі інтервали для $\frac{1}{m}$ та $\lg C$ (довірчу імовірність приймаємо 90%).

Про ступінь близькості експериментальних крапок до параболи, або в просторі логарифмічних координат до прямої, можна судити за коефіцієнтом кореляції

$$r_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i \lg x_i - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)}{\sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2\right] \cdot \left[\frac{1}{n} \sum_i (\lg z_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right)^2\right]}} \quad (2.39)$$

Усі результати розрахунків по цих формулах зведено в таблицю 2.3. Порівнюючи показники форми зерен досліджених марок ми бачимо, що між ними є статистично достовірна відмінність. Зерна брусків АСВ 100/80 більш гостровершинні (таблиця 2.3., параметри C и $\lg C$), чому АСВ 125/100. Трохи несподіваним виявилось те, що зерна брусків АС 200/160 гостріше, чим АСВ 125/100, однак це стає зрозумілим, якщо врахувати наступні обставини:

1. Форма вершини зерен на робочій поверхні інструмента залежить як від геометрії вихідних абразивних зерен, так і від ступеня їх затуплення.
2. Досліджені бруски АС 200/160, М1, 50% працювали в умовах інтенсивного самозагострювання, тому зерна виривалися, не встигаючи затуплюватися.
3. Форма профілю зерен на невеликому рівні від вершини досить слабо залежить від зернистості, тому що мікровершини зерен приблизно однакові.

Таблиця 2.3 – Результати ступеневої апроксимації профілю зерен

№ п/п	Показники	Зернистість		
		АС 200/160 МІ/Сu, 50%	АСВ 125/100 МІ/Сu, 50%	АСВ 100/80 МІ/Сu, 50%
1	2	3	4	5
1.	Число інтервалів висоти n	7	11	11
2.	$t_{q,n-2}$	2,015	1,833	1,833
3.	$S_{\lg C}$	0,0031	0,0034	0,0040
4.	$S_{\frac{1}{m}}$	0,019	0,020	0,022

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5
5.	$\lg C$	$2,354 \pm 0,006$	$2,0131 \pm 0,006$	$2,400 \pm 0,007$
6.	C	$0,0226 \pm 0,0030$	$0,0131 \pm 0,0020$	$0,0251 \pm 0,0040$
7.	$\frac{1}{m}$	$1,70 \pm 0,04$	$1,82 \pm 0,046$	$1,67 \pm 0,04$
8.	m	$0,58 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,02$
9.	ρ_k	0,99	0,99	0,98

б. Закон розподілу зерен по висоті

Спочатку розбиваємо всю висоту h профілограми царапанного зразка на інтервали $\Delta h_i = 1 \text{ мкм}$ і підраховуємо кількість подряпин $n_{\psi i}$, що потрапили в інтервал h_i (середина інтервалу). Якщо яка-небудь подряпина попадає точно на границю інтервалів, то її відносимо наполовину до кожного інтервалу. Потім вимірюємо сумарну довжину $(\sum L)_i$ ділянок металу, маючі висоту більше та вчисляємо відносну довжину опорного профілю.

$$P_i = \frac{1}{L} (\sum L)_i,$$

де L - повна довжина профілограми.

Ділячи $n_{\psi i}$ на P_i та на Δh_i отримуємо функцію $\eta(h_i)$ - щільність розподілу глибини канавок з урахуванням імовірності їх перекриття [18].

Послідовність обчислень для однієї з ділянок зразка, царапанного бруском АС В 125/100, М1, 50%, показано в таблиці 2.4. (початком відліку висоти служить полірована поверхня зразка).

Таблиця 2.4 – Розрахунки щільності розподілу глибини канавок для бруска АСВ 125/100, М1, 50% ($L=34,0$ мм)

h_i , мкм	1	2	3	4	5	6
$n_{\psi i}$, шт	49,5	43,0	29,5	22,0	17,0	9,5
P_i	0,844	0,897	0,930	0,958	0,976	0,988
$\eta(h_i) \cdot 10^3, \frac{\text{шт}}{\text{мкм}^2}$	1,725	1,410	0,933	0,675	0,512	0,283
h_i , мкм	7	8	9	10	11	12

Продовження таблиці 2.4

$n_{\text{ці}}, \text{шт}$	3,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P_i	0,955	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$\eta(h_i) \cdot 10^3, \frac{\text{ШТ}}{\text{МКМ}^2}$	0,088	0,088	0,029	0,029	0,029	0,000

Аналогічні розрахунки зернистостей $\eta(h)$ виконані для всіх брусків зазначених вище.

Надалі необхідно апроксимувати експериментальні $\eta(h)$ степеневими залежностями:

$$\eta(h) = k_{\eta} \cdot h^{\beta_{\eta}}. \quad (2.40)$$

Початок відліку висоти при цьому вибираємо так, щоб точність статичної апроксимації була найбільшою.

Розрахунок коефіцієнтів k_{η} та β_{η} в ведем методом найменших квадратів за тими формулами, що й розрахунок параметрів форми зерен(2.36 - 2.39), тільки замість $\bar{x}, z(\bar{x}), \frac{1}{m}, C$, будуть фігурувати $h, \eta(h), B_{\eta}, k_{\eta}$. Тому одразу приводим кінечні результати, зведені в таблиці 2.5, аналогічно табл. 2.3. Для ілюстрації показані графіки середнього значення функції (рис. 2.5. а,б,в).

Таблиця 2.5 – Степенева апроксимація щільності розподілу глибини канавок (шт./мкм²)

№ п/п	Показаники	Зерно		
		АС 200/160 МІ/Сu, 50%	АСВ 125/100 МІ/Сu, 50%	АСВ 100/80 МІ/Сu, 50%
1	Число брусків	3	3	3
2	Число інтервалів n	15	12	11
3	$t_{10\%,n-2}$	1,770	1,812	1,833
4	$S_{\lg k_{\eta}}$	0,032	0,082	0,034
5	$S_{\beta_{\eta}}$	0,183	0,020	0,146
6	$\lg k_{\eta}$	8,857±0,057	7,744±0,036	6,256±0,062
7	$k_{\eta} \cdot 10^6$	0,073±0,010	0,55±0,01	1,82±0,26
8	β_{η}	3,06±0,32	3,05±0,15	2,69±0,27
9	ρ_k	0,997	0,996	0,987

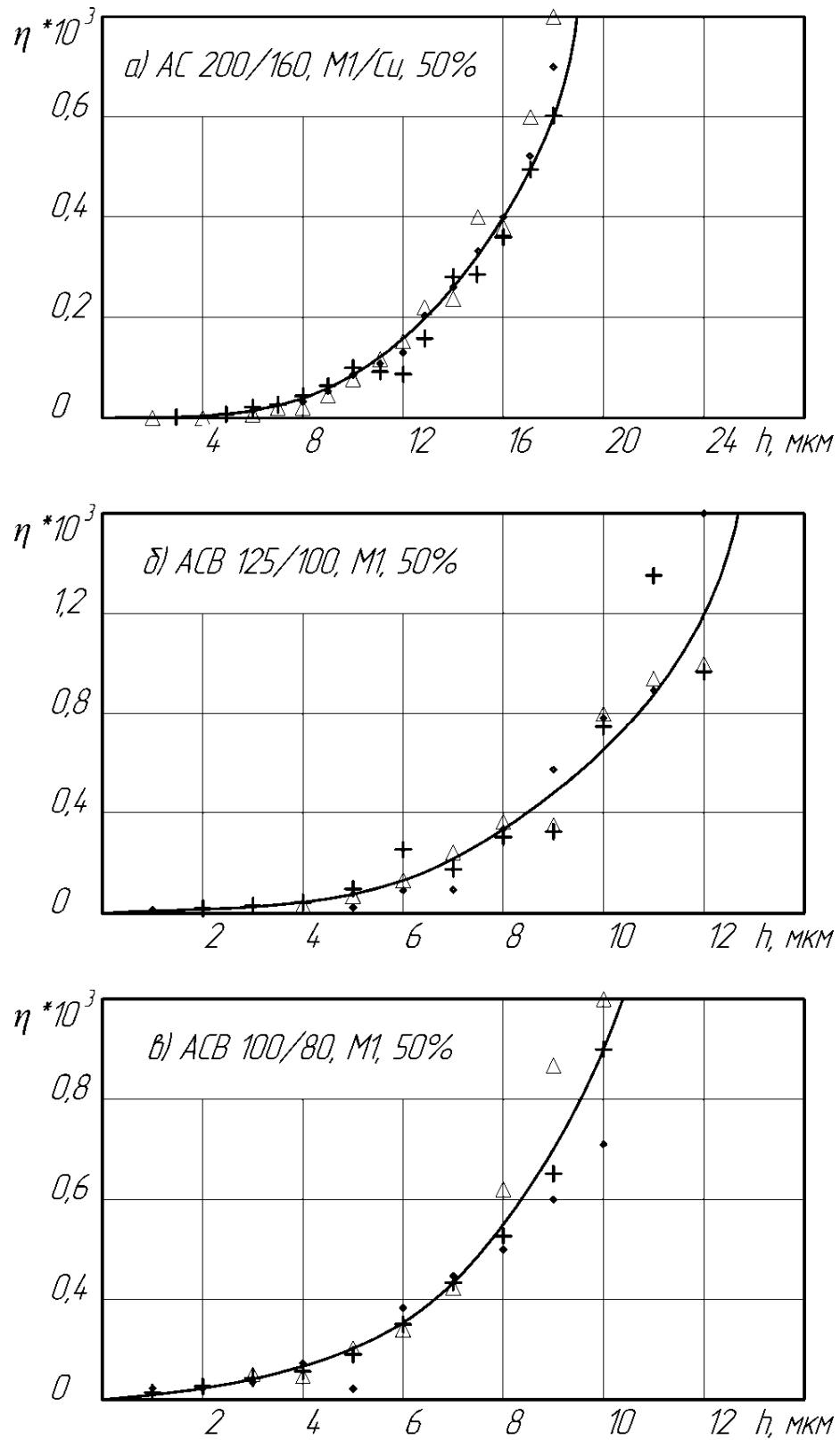


Рисунок 2.5 – Щільність розподілу глибин подряпин (шт./мм²). Для брусків: а) AC 200/160, M1/Cu, 50%; б) ACB125/100, M1, 50%; в) ACB 100/80, M1, 50%

Знаходження закону розподілу зерен по висоті ріжучого шару проводиться по формулі щільності розподілу зерен по висоті (2.24). Наприклад, для брусків АСВ 125/100, М1, 50% маємо:

$$n(h) = k \cdot h^{\beta} = \frac{0.55 \cdot 10^{-6} \cdot 6.311 \cdot h^{3.05-0.5}}{\sqrt{2 \cdot 3.14 \cdot 52.5 \cdot 10^3 \cdot 3.747}} = 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot h^{2.55}$$

Закон розподілу в інтегральній формі:

$$N(h) = 0.49 \cdot 10^{-9} \cdot h^{3.55} = k_N \cdot h^{\beta_N} \quad (\text{шт/мкм}^2)$$

Довірчі інтервали для параметрів знаходимо, підставляючи у формулу (2.24) крайні значення k_N і β_N . Підсумкові дані зведено в таблицю 2.6, а також побудовані графіки закону розподілу $N(h)$ для дослідження зернистостей (рис. 2.6).

Таблиця 2.6 – Параметри закону розподілу зерен по висоті $n(h)$ (шт/мкм²), або $N(h)$ (шт/мкм²)

№ п/п	Показники	Зерно		
		АС 200/160 МІ/Сu, 50%	АСВ 125/100 МІ/Сu, 50%	АСВ 100/80 МІ/Сu, 50%
1	$k \cdot 10^9$	0.232±0.032	1.79±0.12	5.39±0.75
2	β	2.56±0.32	2.55±0.13	2.19±0.22
3	$k_N \cdot 10^9$	0.065±0.009	0.49±0.034	1.69±0.24
4	β_N	3.56±0.32	3.55±0.13	3.19±0.22

Отримані результати показують вплив зернистості брусків на закон розподілу зерен по висоті. Зі збільшенням зернистості підвищується висота зерен над рівнем зв'язування й одночасно різко зменшується число зерен на одиниці площі інструмента. Це веде до деякого зростання показника ступені β і до значного зменшення коефіцієнта k . Однак розглядати зміни β і k незалежно друг від друга не можна, тому що тільки їхня комбінація характеризує форму й значення закону розподілу. Наприклад, зсув початку відліку глибини подряпин на кілька мікрометрів приводить до істотних змін обох параметрів β і k .

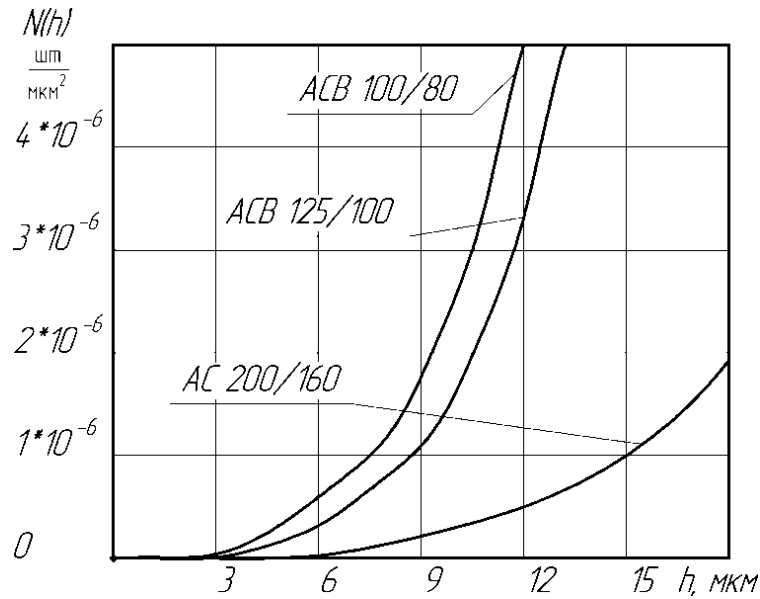


Рисунок 2.6 – Закон розподілу зерен по висоті $N(h)$.

Як приклад виконаємо розрахунки геометричних характеристик ріжучої поверхні брусків АСВ 125/100, М1, 50%.

Використовуючи формули (2.13-2.17) і дані таблиць 2.1-2.5 знаходимо:

$$S_0(H) = \frac{3.14 \cdot (1 + 0.17^2) \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 1.0465 \cdot H^{4.65}}{2 \cdot 0.0131^{0.55} \cdot 142.46} = 0.822 \cdot 10^{-8} \cdot H^{4.65},$$

$$S_p(H) = \frac{2 \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 0.8882 \cdot H^{5.10}}{0.0131^{0.55} \cdot 142.46} = 0.822 \cdot 10^{-9} \cdot H^{5.10},$$

$$\gamma(H) = -\arctg \left[\frac{S_0(H)}{S_p(H)} \right] = -\arctg(22.7 \cdot H^{-0.45}),$$

$$\lambda(H) = \frac{2 \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 0.8882 \cdot H^{4.10}}{0.0131^{11} \cdot 65.853} = 4.19 \cdot 10^{-9} \cdot H^{4.10} \left(\frac{\text{шт}}{\text{мкм}} \right),$$

$$E(H) = \frac{3.14 \cdot (1 + 0.17^2) \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 1.0465 \cdot H^{4.65}}{0.0131^{11} \cdot 65.853} \\ = 3.73 \cdot 10^{-8} \cdot H^{4.65}.$$

Аналізуючи ці залежності можна бачити, що проєкції площі контакту S_0 , S_p дуже швидко зростають зі збільшенням глибини впровадження H . Передній кут γ міняється значно повільніше: від -90° при $H=0$, до $-81^\circ 40'$ при $H=14$ мкм.

Для перевірки отриманих даних зіставимо характеристики безперервної моделі $\lambda(H)$ і $E(H)$, знайдені шляхом розрахунків, з експериментальними значеннями, певними безпосередньо по профілограмі АСВ 125/100, М1, 50%. На рис.2.7 у логарифмічних координатах побудовані розрахункові графіки функцій $\lambda(H)$, $E(H)$ і нанесені експериментальні крапки. У діапазоні висоти до 14 мкм, у якому проводилися вимір глибини подряпин, відповідність розрахункових і експериментальних даних задовільне, що підтверджує правильність розробленої методики дослідження закону розподілу по висоті й форми вершин абразивних зерен.

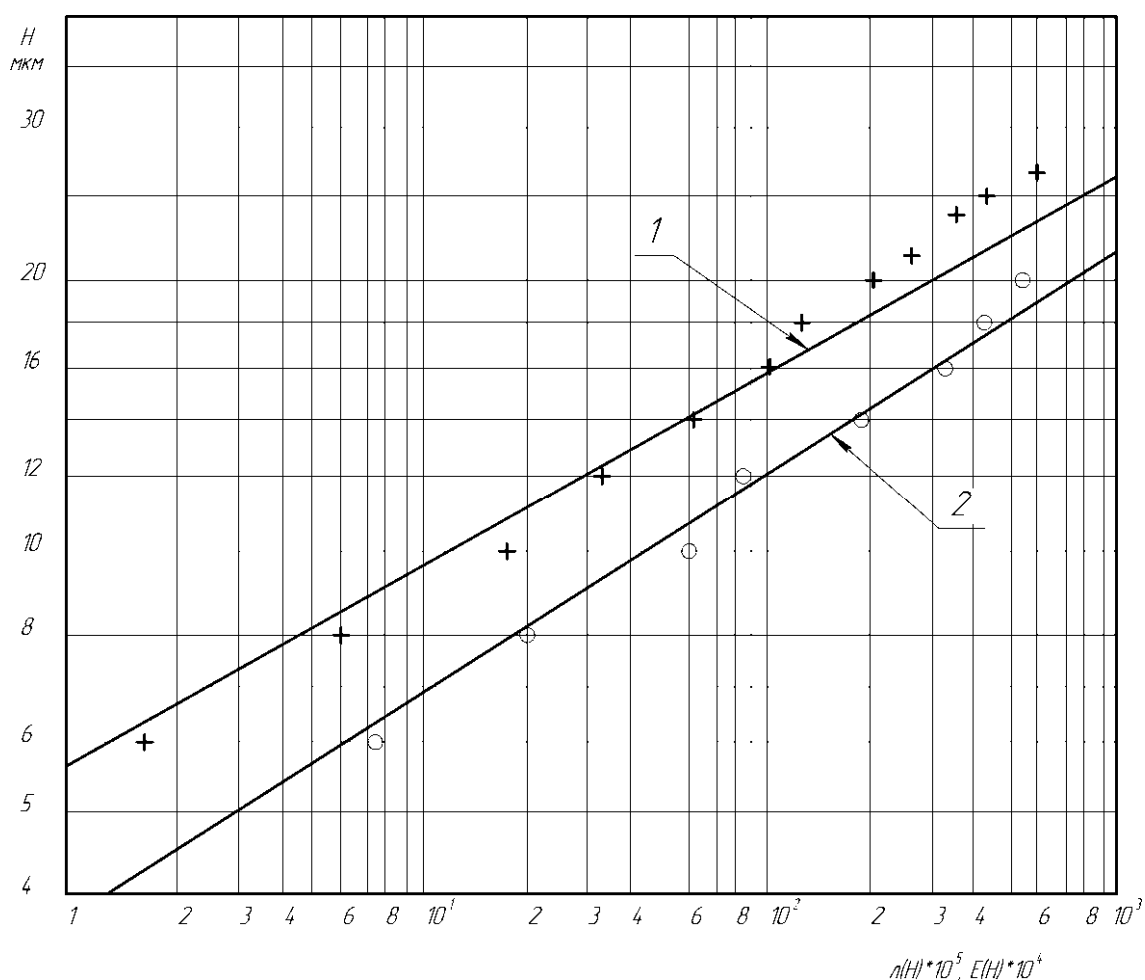


Рисунок 2.7 – Порівняння експериментальних (крапки) і розрахункових значень функцій: 1 – середнє число виступів, $\lambda(H) \cdot 10^5$ (шт/мкм²),

2- розподіл висоти нерівностей, $E(H) \cdot 10^4$

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ШЛАМУ Й МОР У ПІДБРУСКОВОМУ ПРОСТОРИ НА ПРОЦЕС ХОНІНГУВАННЯ

На закономірності хонінгування впливає процес руху шламу й МОР у зоні різання, а також вплив зворотних зв'язків на зусилля притиску брусків до деталі.

Прямий вимір величини тиску шламу й МОР у мікрообсягах зони різання представляє більші технічні труднощі, тому ми поставили завдання теоретично розглянути механізми виникнення цього явища й дати оцінку його впливу на закономірності хонінгування, а також зрівняти отримані висновки з експериментальними даними.

3.1 Дослідження закономірностей підвищення тиску шламу й МОР

3.1.1 Рух шламу

Шлам, що утворюється при різанні, не може вільно віддалятися із зони різання, тому що нерівності зв'язування брусків і виступаючі з неї абразивні зерна затримують тверді частки. Частки, що накопичуються під бруском, шламу давлять один на одного, на поверхні бруска й деталі, що створює підвищений тиск шламу в підбрусковому просторі. Під дією цього тиску, а також сил тертя про, що рухається щодо інструмента поверхні деталі шламу витісняється з-під бруска й у такий спосіб установлюється динамічна рівновага між вступом і видаленням шламу в зоні різання.

При хонінгуванні тендітних і малопластичних матеріалів стружка має вигляд дрібних лусочок, які можуть пересуватися в підбрусковому просторі.

У нормальних умовах зона різання частки, що й перебувають у ній, змочені МОР, тому тертя в шламі носить рідинний характер, а його рух подібний плинуну грузлої рідини. Аналогія із грузлою рідиною наближене відбиває важливі сторони процесу й дає можливість проаналізувати закономірності руху шламу за допомогою відомих методів гідродинаміки.

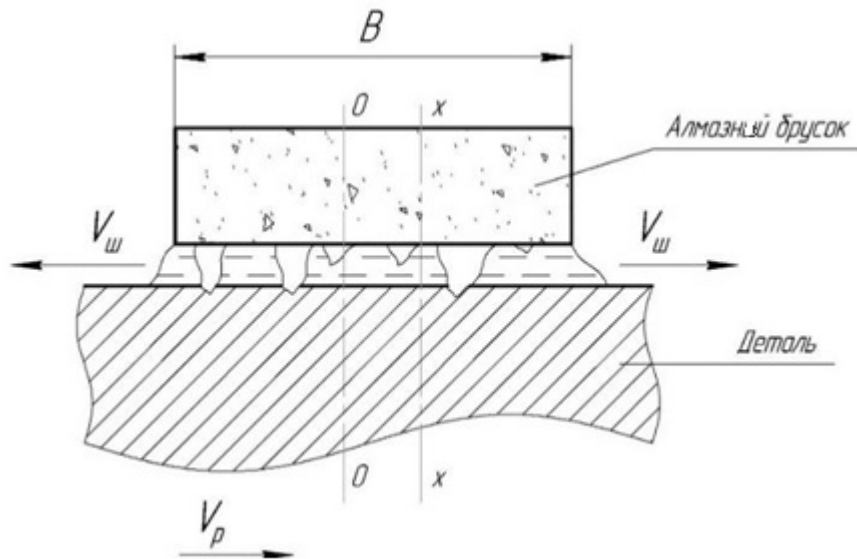


Рисунок 3.1 – Схема руху шламу.

Зв'язок шламу з поверхнею бруска, що має значну глибину нерівностей, набагато більше, чим з порівняно гладкою поверхнею. Тому в першому наближенні зв'язок шламу з деталлю можна не враховувати. Так як висота зазору δ_0 між зв'язкою брусків та деталлю набагато менше ширини B ($\delta_0 \ll B$), а довжина L брусків велика ($L \gg B$), то потік шламу вважається одночастним та симетричним відносно перетину 0-0.

Притактих умовах тиск шламу в зазорі описується рівнянням:

$$\frac{dQ_{ш}}{dx} = -R \cdot \eta_{ш} \cdot [V_{ш}(x)]^{\alpha_1}, \quad (3.1)$$

де R - коефіцієнт гідравлічного опору руху шламу в підбрусковому просторі,

α_1 - показник ступеня,

$\eta_{ш}$ - в'язкість шламу,

$Q_{ш}$ - середній тиск шламу,

$V_{ш}(x)$ - швидкість шламу в перетині X-X.

Кількість шламу, що проходить через деякий перетин X – X, дорівнює обсягу металу, знятому відповідної поверхнею бруска, тому

$$V_{ш}(x) = \frac{k_n \cdot V_p \cdot b \cdot x}{\delta_0}, \quad (3.2)$$

де k_n - відношення щільності металу до щільності шламу,

x - кількість шламу,

V_p - швидкість різання,

b - інтенсивність знімання.

Вирішуючи рівняння (3.1) знаходимо тиск в перетині X – X, а потім середній тиск шламу на брусок:

$$Q_{ш} = C_{ш}(V_p \cdot b)^{\alpha_1} \cdot b^{\alpha_1+1}, \quad (3.3)$$

де для зручності запису позначено:

$$C_{ш} = \frac{R \cdot \eta_{ш}}{\alpha_1+2} \cdot \left(\frac{k_n}{\delta_0}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\alpha_1+1}. \quad (3.4)$$

Вирази (3.3), (3.4) показують, що тиск шламу збільшується з ростом швидкості різання, інтенсивності знімання, в'язкості шламу, що залежить від в'язкості МОР, і ширини брусків. Збільшення зазору між зв'язуванням і поверхнею деталі зменшує тиск шламу.

3.1.2 Рух МОР

Слід розрізнати два види плин МОР у підбрусковому просторі:

- змушений плин під дією відносного руху бруска й деталі;
- капілярний плин між частками шламу.

Капілярний плин відбувається поблизу активних зерен, де безупинно утворюється велика кількість часток стружки, що мають сухі поверхні. Проникнення МОР до цих ділянок здійснюється завдяки силам поверхневого натягу. Для стійкого змочування всіх ділянок зони різання необхідно, щоб швидкість капілярного руху МОР була досить високою. Інакше МОР не буде встигати проникати між частками, що рухаються, стружки до ріжучих зерен, тертя з рідинного перейде в сухе, стружка впровадитися, у зв'язування й настане забруднення брусків.

Тому при виборі МОР для хонінгування необхідно забезпечити в числі її інших фізико-хімічних властивостей максимальну швидкість капілярного руху

(растекаемость, тобто властивість рідини поширюватися по твердій поверхні під дією сили ваги) МОР. Капілярний рух МОР не супроводжується підвищенням тиску.

а. Гідродинамічний клин

Гідродинамічний клин утворюється, якщо зазор між ковзними тілами звужується в напрямку руху рідини. При хонінгуванні звуження зазору між зв'язуванням і поверхнею деталі відбувається завдяки тому, що піддією окружної силрізання абразивні бруски пружно деформують корпус хонголівки й повертаються на деякий кут.

У початковий період хонінгування за рахунок погрішностей форми оброблюваних деталей сили різання максимальні, отже, пружний поворот брусків також максимальний. У цей же період відбувається найбільш інтенсивне зношування брусків, тому їх поверхня після приробляння вирівнюється щодо поверхні деталей у положенні, відповідним до максимального повороту брусків. На другому етапі, через 10-20 з від початку хонінгування, після усунення основних погрішностей форми деталі, сили різання знижуються в 1, 5-3 рази й бруски під дією пружності корпусу хонголівки повертаються у зворотному напрямку (рис.3.2).

Таким чином, на другому етапі хонінгування плин МОР у зоні різання відбувається в звуженому зазорі й виникає гідродинамічний клин, подібний діючому в підшипниках ковзання.

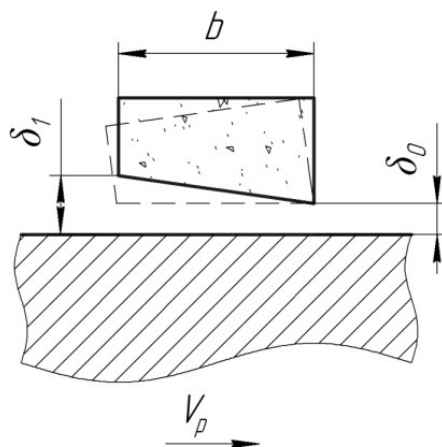


Рисунок 3.2 – Схема гідродинамічного клина

Середнє значення тиску МОР у підбрусковому просторі можна визначити на основі залежностей, відомих з теорії змащення [33]:

$$Q_c = \frac{G \cdot V_p \cdot \eta_c \cdot b}{\delta^2} \cdot \left(\frac{\ln(1+k)}{k^2} - \frac{2}{k \cdot (k+2)} \right), \quad (3.5)$$

де η_c – в'язкість

b – ширина алмазного бруска,

$\delta = (\delta_1 - \delta_0)$ – різниця товщини зазору на вході й виході потоку МОР,

$k = \frac{\delta}{\delta_0}$ – коефіцієнт звуження зазору.

Для визначення величини δ взглянемо деформацію корпусу хонголівки.

Окружна сила F_{ok} , діючи на бруски, створює в стінках корпусу реакції:

$$F_1 = \frac{r+r_b}{r} \cdot F_{ok}, F_2 = \frac{r_b}{r} \cdot F_{ok}, \quad (3.6)$$

Кожну зі стінок корпусу приблизно можна розглядати як призматичний стрижень трикутного перетину, жорстко затиснений по кінцях і працюючий на крутіння (Рис.3.3). Геометрична твердість при крутінні такого стрижня, що має сторону перетину r і висоту h , рівна

$$J_T = \frac{1}{30} \cdot r \cdot h^3, \quad (3.7)$$

У цьому випадку:

$$h = r \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (3.8)$$

Тому

$$J_T = 0.0216 \cdot r^4. \quad (3.9)$$

При зміні ^Tокружної сили на величину ΔF_{ok} звуження зазору буде рівно

$$\delta = \frac{M_{KP} \cdot l_0 \cdot b}{2 \cdot G \cdot J_T} = 23.2 \cdot \frac{\Delta F_{ok} \cdot \left(r_b + \frac{1}{2}r\right) \cdot l_0 \cdot b}{G \cdot r^4}, \quad (3.10)$$

де G – модуль зрушення матеріалу корпусу хонголівки,

l_0 – довжина ділянки, що скручується, стінки хонголівки.

Фактично G може мати трохи більше значення через контактні деформації, прогин стінки й зниження її крутильної твердості за рахунок вилучення під пластмасову напрямну, виконану в корпусі хонголівки. При

необхідності всі ці фактори можна врахувати в уточненому розрахунках деформацій.

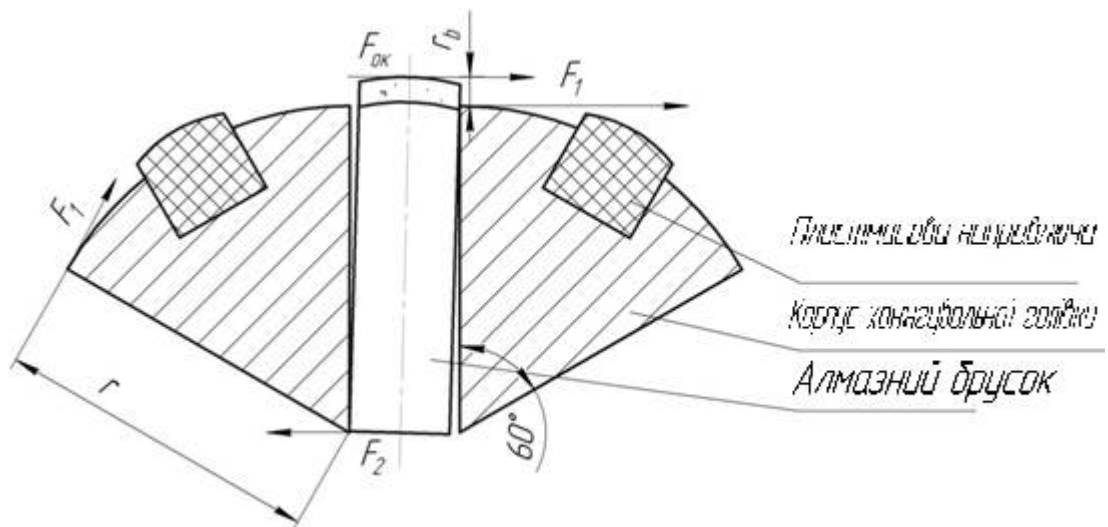


Рисунок 3.3 – Схема діючих сил у хонголівці

Як приклад розрахуємо гідродинамічний тиск при алмазному хонінгуванні чавунних гільз, прийнявши наступні вихідні дані:

$r_b = 7 \text{ мм.}$, $r = 28 \text{ мм.}$, $l_0 = 30 \text{ мм.}$, $b = 12 \text{ мм.}$, $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$, $G = 7,8 \cdot 10^6 \text{ МПа}$, $V = 1000 \text{ мм/с}$, $\alpha = 60^\circ$, $\Delta F_{ок} = 9,8 \text{ МПа}$, $\eta_c = 1,66 \cdot 10^{-9} \text{ МПа}$ (для гасу при $T=40^\circ \text{ С}$), $\eta_c = 8,82 \cdot 10^{-9} \text{ МПа}$ (для солярного масла при $T=40^\circ \text{ С}$).

Величина звуження зазору

$$\delta = 23,2 \cdot \frac{1000 \cdot \left(7 + \frac{1}{2} \cdot 28\right) \cdot 30 \cdot 12}{7,8 \cdot 10^6 \cdot 28^4} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ (мм)}$$

Середній тиск МОР на бруски (при охолодженні гасом):

$$Q_c = \frac{7,8 \cdot 1000 \cdot 1,66 \cdot 10^{-9} \cdot 12}{(5 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \left(\frac{\ln 8,4}{7,4^2} - \frac{2}{7,4 \cdot 9,74} \right) = 0,13 \text{ (МПа)},$$

а при охолодженні МОР з в'язкістю, близької до солярного масла, тиск зросте до 0,7 Мпа.

Зі збільшенням тиску в підбрусковому просторі абразивні зернавпроваджуються в метал на меншу глибину, що збільшує зазор δ_0 обмежує ріст тиску МОР і, тим самим, при хонінгуванні брусками на пористих

зв'язуваннях тиск МОР зменшується за рахунок фільтрації рідини із зони різання через пори зв'язування.

б. В'язкістний клин

Змінні температури й в'язкість у потоці МОР приводять до підвищення гідродинамічного тиску. Подібне явище, що відбувається в підшипниках ковзання й назване в'язкістним клином. Фізична сутність цього явища наступна.

До нагрітого бруска підходить охолоджена МОР з поверхні деталі, яка після проходження зони різання нагрівається майже до тієї ж температури, що й брусок. Тому на вході в зазор в'язкість МОР поблизу від поверхні деталі більше, чим у поверхні бруска, а на виході із зазору градієнт в'язкості значно менше. Внаслідок цього поверхня, що рухається, деталі зтягує в зазор більша кількість МОР, чим виносить із нього (рис. 3.4). Надлишковий приплив рідини в підбрусковий простір викликає підвищення її тиску, який гальмує потік на вході й прискорює його на виході, вирівнюючи витрати у всіх перетинах.

Через те, що підвищення тиску залежить від надлишкового припливу МОР на вході в зазор, то для наближеної оцінки тиску у в'язкостном клині можна зрівняти надлишковий приплив МОР при в'язкостном і гідродинамічному клині. Для цього умовно ухвалюємо, що підвищення тиску не впливає на потік рідини в зазорі.

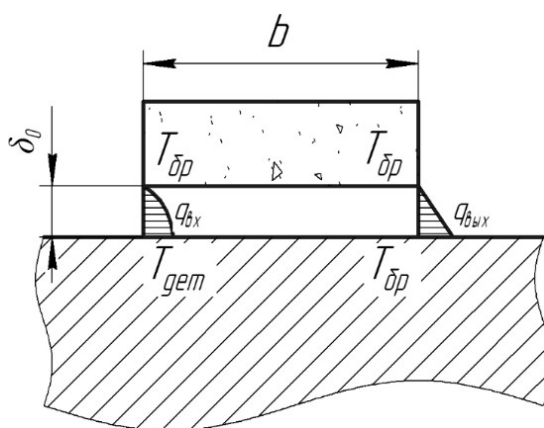


Рисунок 3.4 – Схема утворення в'язкостного клина

При гідродинамічному клині різниця витрат на вході й виході зазору:

$$q_{\text{над}} = \frac{1}{2} \cdot V_p \cdot (\delta_1 - \delta_0) \quad , \quad (3.11)$$

або у відносних величинах

$$\frac{q_{\text{над}}}{q_{\text{вих}}} = k \quad . \quad (3.12)$$

Для розрахунків $q_{\text{над}}$ при в'язкостном клині вважаємося товщину зазору постійної і рівної δ_0 . Нехай різниця температур поверхонь бруска й деталі на вході в зазор рівна ΔT , а на виході дорівнює нулю. Зміна температури по товщині зазору (z) близько до лінійного, тому

$$T_z = T_g + \frac{\Delta T}{\delta_0} \cdot z \quad . \quad (3.13)$$

В'язкість МОР залежить від температури:

$$\eta(z) = \eta_g \cdot e^{\frac{A \cdot \Delta T}{\delta_0} \cdot z} \quad , \quad (3.14)$$

де A - постійн, що залежить від фізичних властивостей МОР.

η_g - в'язкість при температурі деталі на виході із зазору.

Розподіл швидкості МОР у потоці $u(z)$, при відсутності впливу тиску, можна знайти з рівняння Рейнольдса

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d}{dz} \left[\eta(z) \cdot \frac{du(z)}{dz} \right] = 0 \quad . \quad (3.15)$$

Вирішуючи рівняння й виконавши інтегрування по z знаходимо витрату МОР на вході:

$$q_{\text{вх}} = V_p \cdot \delta_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\ln n} + \frac{1}{n-1} \right) \quad . \quad (3.16)$$

Де для зручності введено позначення для величини відносини в'язкостей МОР при температурі деталі й температурі бруска:

$$n = \frac{\eta_g}{\eta_b} = e^{A \cdot \Delta T} \quad . \quad (3.17)$$

Надлишкова витрата при цьому дорівнює:

$$q_{\text{над}} = V_p \cdot \delta_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\ln n} + \frac{1}{n-1} \right) \quad , \quad (3.18)$$

або у відносному вигляді:

$$\frac{q_{\text{над}}}{q_{\text{вих}}} = 1 - \frac{2}{\ln n} + \frac{2}{n-1} . \quad (3.19)$$

Чисельні розрахунки по наведених залежностях показують, що в умовах процесу хонінговання надлишковий приплив МОР для в'язкостного клина становить 0,1-0,3 цієї величини для гідродинамічного клина, що приводить до відповідного підвищення тиску МОР.

Закономірності впливу різних фізичних факторів на тиск у в'язкістному клині аналогічні розглянутим вище для гідродинамічного клина. При необхідності більш докладного аналізу явища в'язкістного клина можна скористатися дослідженнями з теорії змащення.

3.2 Вплив тиску шламу й МОР у підбрусковому просторі на процес хонінговання

Підвищений тиск шламу й МОР у зоні різання зменшує зусилля абразивні зерна, що впроваджуються у метал, але загальне зусилля, що діє на деталь і зухвале її деформацію, не знижується. Внаслідок цього відбувається зменшення продуктивності й погіршення точності обробки.

У результаті експерименту встановлене, що швидкість знімання нелінійно залежить від швидкості різання й ширини брусків. Тому існують деякі граничні значення швидкості різання ($V_{P,\Pi}$) і ширини суцільних брусків (b_{Π}), перевищення яких веде до зменшення продуктивності обробки:

$$V_{P,\Pi} = \frac{Q \cdot \delta_0^2}{Q_c \cdot \eta_c \cdot b \cdot (1+t)} , \quad (3.20)$$

$$b_{\Pi} = \frac{Q \cdot \delta_0^2}{Q_c \cdot \eta_c \cdot V_p \cdot (1+t)} . \quad (3.21)$$

Збільшення в'язкості МОР підвищує тиск у підбрусковому просторі, знижує інтенсивність і швидкість знімання металу, але при цьому поліпшується чистота обробки, тому що абразивні зерна впроваджуються на меншу глибину.

Такий вплив в'язкості МОР на продуктивність обробки експериментально виявлене, але фізичні механізми цієї залежності не були з'ясовані. Але в процесі досліджень було виявлено, що при хонінгуванні загартованої сталі алмазними брусками додавання в гас 1/5 частини веретенного масла №2 зменшує знімання на 20%, а 1/2 частини на 30-40 %.

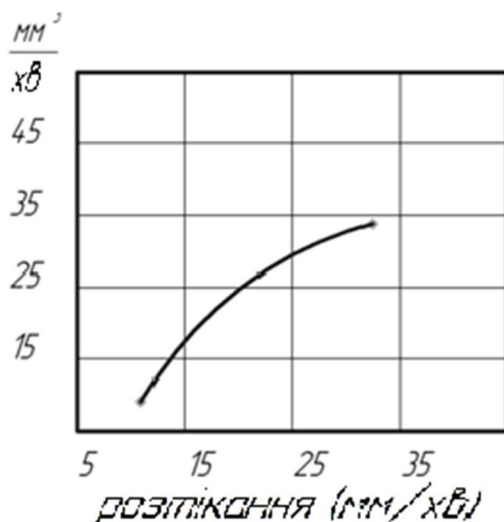


Рисунок 3.5 – Вплив розтікання МОР на продуктивність хонінгування

Збільшення в'язкості також повинне знижувати граничну швидкість різання. Наприклад, при хонінгуванні з охолодженням чистим гасом, тиск на бруски $Q = 0,98 \text{ МПа}$, $t = 1,1$

Аналогічно при використанні МОР з в'язкістю, близькою до в'язкості солярового масла, $V_{р.п} = 38 \left(\frac{\text{М}}{\text{ХВ}}\right)^p$ Гранична швидкість різання й ширина брусків взаємозалежні, тому, якщо задана швидкість різання V_p , те можна знайти граничну ширину брусків $b_{п}$ Наприклад, при $V_p = 2000 \left(\frac{\text{ММ}}{\text{С}}\right)$, МОР-гас:

$$b_{п} = \frac{0.98 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{0.13 \cdot 1.7 \cdot 10^{-9} \cdot 2000 \cdot 2.1} = 20 (\text{ММ}).$$

А при МОР з в'язкістю близькою до солярового масла $b_{п} = 40 \text{ мм}$.

Гранична швидкість різання й ширина брусків залежить також від висоти зазору між зв'язуванням і деталлю, яка визначається, в основному, зернистістю брусків. Тому застосування дрібнозернистих брусків вимагає зниження швидкості різання і їх ширини.

Із проведених розрахунків випливає, що при грузлих МОР, наприклад, керосино-масляних сумішах, гідродинамічні явища дуже впливають і значне обмежують припустиму швидкість різання й ширину брусків, що необхідно враховувати при призначенні режимів обробки. Досвідчені дані на вибір швидкості різання приводяться в багатьох роботах, у них вказується, що оптимальна швидкість різання при хонінгованні чавуну з використанням малов'язких МОР рівна 80-100 м/хв, а зі збільшенням в'язкості необхідна швидкість знижується до 50 м/хв. Дослідження із впливу в'язкості на оптимальну ширину брусків відсутня. На величину тиску шламу й МОР впливає кут нахиле траєкторій брусків до осі деталі α . З збільшенням α і наближенню його до 90° відбуваються два конкуруючі процеси, а саме:

- зменшення довжини шляхи, прохідного частками шламу під бруском, що знижує тиск у підбрусковому просторі й полегшує знімання металу.
- зерна перетинають гребінці металу під меншим кутом, що погіршує умови різання.

Тому повинне бути певне оптимальне значення кута α . З практики відома подібна залежність продуктивності від кута α (рис. 3.6).

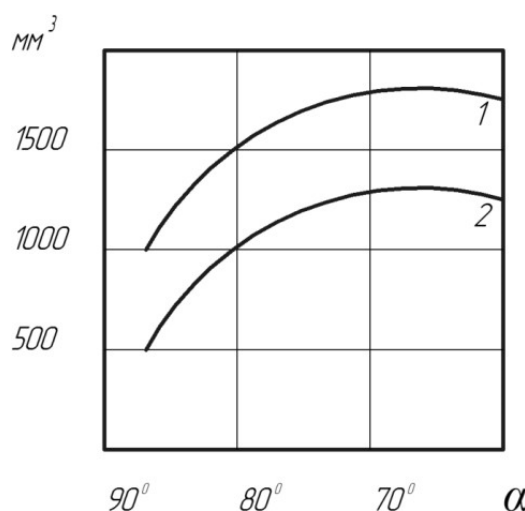


Рисунок 3.6 – Залежність знімання металу від кута α при тривалості досліду 120 сек. (1. $Q=0,29$ Мпа, 2. $Q=0,14$ Мпа)

3.3 Хонінгування брусками з переривчастою робочою поверхнею

Зниження тиску шламу й МОР у підбрусковому просторі є значним резервом для підвищення ефективності хонінгування. Цього можна добитися шляхом зменшення площі суцільного контакту брусків з оброблюваною деталлю, наприклад, за рахунок зниження ширини брусків або нанесення канавок на їхню робочу поверхню.

Використання вузьких брусків приводить до зменшення сумарної ріжучої поверхні, тому для підтримки високої продуктивності одночасно слід побільшати кількість брусків у хонголівці.

У промислових масштабах бруски можна одержувати методами порошкової металургії із застосуванням фігурних пуансонів, а в невеликих кількостях шляхом прорізки канавок на суцільних брусках. Розташування канавок на поверхні брусків може бути: поздовжнім, поперечним, похилим і перехресним.

Оцінімо з погляду положення про підвищення тиску в підбрусковому просторі потенційну ефективність хонінговальних брусків з переривчастою робочою поверхнею.

Співвідношення інтенсивності знімання при суцільних і переривчастих брусках.

$$k_e = \left(\frac{b^*}{b}\right) = \left(\frac{Q-Q_{\Pi}^*}{Q-Q_{\Pi}}\right)^t. \quad (3.22)$$

Де значком (*) відзначені параметри для переривчастих брусків.

Нехай, наприклад, для умов хонінгування: $r_b = 7$ мм., $r = 28$ мм., $l_0 = 30$ мм., $b = 12$ мм., $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм., $G = 0.78 \cdot 10^5$ МПа, $V = 1000$ мм/с $\alpha = 60^\circ$, $\Delta F_{ок} = 9,8$ Мпа, $\eta_c = 1.66 \cdot 10^{-9}$ МПа, МОР-гас, замість суцільних брусків застосовані бруски з переривчастою робочою поверхнею, які мають рівну площу робочої поверхні й дві поздовжні канавки. При цьому ширина кожної суцільної ділянки буде в 3 рази менше, отже, і тиск МОР знизиться в 3 рази, а швидкість знімання збільшиться:

$$k_e = \left(\frac{0.98 - \frac{0.13}{3}}{0.98 - 0.13} \right)^{1.1} = 1.11.$$

При аналізі роботи брусків з переривчастою робочою поверхнею, що мають ділянки з порівнянною довжиною й шириною, можна застосувати результати розрахунків тиску в мастильному шарі при ковзанні прямокутної подушки по площини. Рис.3.7. показує вплив відносини довжини ділянки α до його ширині β на зменшення тиску МОР у порівнянні із бруском нескінченної довжини. Експериментальні дані підтверджують підвищення продуктивності хонінговання при використанні брусків з переривчастою робочою поверхнею на 20-60%.

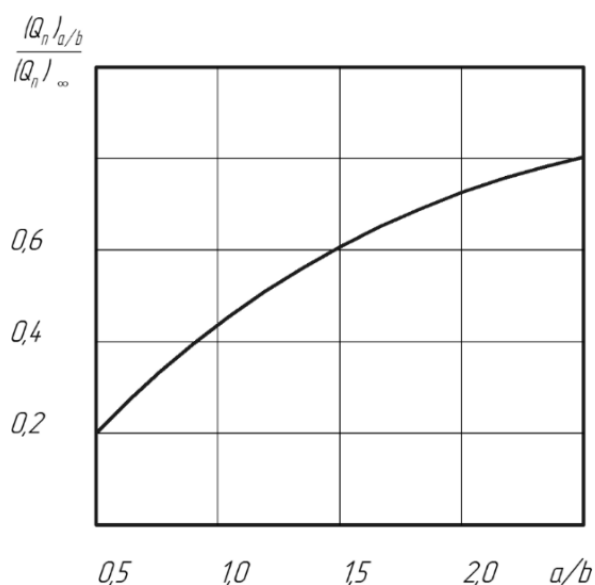


Рисунок 3.7 – Вплив співвідношення a/b на гідродинамічний тиск МОР

Проведене дослідження дає теоретичне обґрунтування застосуванню хонінговальних брусків з переривчастою робочою поверхнею й поряд з експериментальними даними, що мають, дозволяє рекомендувати їх до промислового виробництва.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОНІНГУВАННЯ ЧАВУННИХ ГІЛЬЗ ДВС ХОНІНГУВАЛЬНИМИ БРУСКАМИ З ПЕРЕРИВЧАСТОЮ РОБОЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ Й БЕЗ

Досліджувався вплив характеристик хонінгувальних брусків, швидкостей обертального й зворотно-поступального рухів, а також зусилля притиску брусків до деталі на продуктивність, шорсткість поверхні й точність обробки. Також проведені випробування алмазних брусків з переривчастою поверхнею.

Постановка дослідів велася із застосуванням математичних методів планування експериментів [73], що дало можливість підвищити точність і скоротити обсяг досліджень.

4.1. Умови проведення й обґрунтування плану експериментів

Дослідження проводилися на гільзах Камаз 740 виготовлених зі СЧ25 ДЕРЖСТАНДАРТ 1412-85, хімічний склад зазначено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1- Склад і властивості чавуну

Марка двигуна (чавуну), країна (фірма) - виробник	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	V	M o
Камаз-740, Середньолегований (СНД)	3,1- 3,4	1,9- 2,5	0,6- 0,9	0,2	0,12	0,25 - 0,5	0,15 - 0,4	0,25- 0,4	0,12	-	-

Деталі для експерименту проходили попередню обробку по стандартному технологічному процесі, що включала чорнове й чистове розточування отвору, обточування зовнішньої поверхні й попереднє хонінгування брусками АСВ 125/100 МІ 50%. Час обробки замірявся секундоміром і становив 30-50 с.

Величина знімання металу розраховувалася як різниця середніх розмірів деталі до й після обробки. Деталі вимірялися в трьох перетинах

індикаторним нутрометром із ціною розподілу 0,002 мм (НИ 10-18 0.002 КАЛІБР), причому в кожному перетині знаходили максимальний і мінімальний розміри. Погрішності форми оцінювалися по овальності деталей, яка рівна найбільшій з різниці розмірів у кожному перетині.

План експерименту багато в чому визначається видом математичної моделі, обраної для опису шуканих емпіричних залежностей. У загальному виді зв'язок між вихідною величиною Y і незалежними змінними X_i виражається якоюсь функціональною залежністю,

$$Y = f(x_1, x_2, x_3 \dots). \quad (4.1)$$

Для апроксимації цієї залежності використовуються різні аналітичні функції, наприклад, лінійні поліноми:

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + \dots + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + \dots \quad (4.2)$$

степеневі функції:

$$Y = A \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot x_3^{b_3} \dots \quad (4.3)$$

і інші.

З погляду зручності планування й проведення експерименту доцільні лінійні моделі, однак практика показує, що більшість залежностей при хонінгуванні не лінійних, а близькі до статичних. Щоб сполучити дві ці умови можна застосувати просте приймання - переклад дологарифмічним координатам $y^* = \lg y, x_i^* = \lg x_i$. Тоді в просторі логарифмічних координат статичні залежності стануть лінійними, операція множення заміниться додаванням, і ми одержимо зручну лінійну модель, що має достатню точність.

Для знаходження параметрів лінійних моделей процесу хонінгування використана методика повного факторного експерименту ПФЕ 2ⁿ.

Математичне планування експерименту застосовувалося для дослідження процесів абразивної обробки. Змінні фактори:

- X_1 - тиск на бруски (Q),
- X_2 - окружна швидкість ($V_{ок}$),
- X_3 - осьова швидкість ($V_{ос}$).

Таблиця 4.2 - Рівні змінних факторів у попередніх дослідах

Фактори	Q, (кгс/див2), (МПа)	Vок, (м/хв)	Vос, (м/хв)
	x ¹	x ²	x ³
Верхній +1	10.6 (1,08 МПа)	83.1	14.4
Нижній -1	7.9 (0,8 МПа)	48.2	9.6

Кожний дослід повторювався тричі й розраховувалося середнє значення змінної \bar{Y}_u і дисперсії одиничного значення $S^2\{Y_{ul}\}$.

$$\bar{Y}_u = \frac{\sum_l Y_{ul}}{m}, \quad (4.4)$$

$$S^2\{Y_{ul}\} = \frac{\sum_l Y_{ul} - m \cdot \bar{Y}_u^2}{m}, \quad (4.5)$$

де $l = 1, 2 \dots m$; m - число повторення кожного досвіду.

Скориставшись лінійною моделлю розраховуємо коефіцієнти регресії для швидкості знімання:

$$b_i = \frac{\sum_u x_{ui} \cdot \bar{Y}_u}{N}, b_{ij} = \frac{\sum_u x_{ui} \cdot x_{uj} \cdot \bar{Y}_u}{N}, \quad (4.6)$$

де N - число досвідів у матриці планування ($N=8$).

Таблиця 4.3 - Матриця планування й результати попередніх досвідів

№	Змінні фактори			Вихідні параметри		
	X1	X2	X3	Величина знімання на діаметр деталі (мкм)	Швидкість знімання, \bar{Y}_u (мкм/хв)	Дисперсія $s^2\{Y_{ul}\}$
1	-1	-1	-1	53,8	162	128
2	+1	-1	-1	57,2	172	8
3	-1	+1	-1	66,9	200	338
4	+1	+1	-1	75,0	230	675
5	-1	-1	+1	58,1	174	826
6	+1	-1	+1	60,2	180	334
7	-1	+1	+1	72,0	216	1980
8	+1	+1	+1	82,3	246	1078

У результаті розрахунків отримане рівняння регресії в кодованому виді

$$Y = 65.5 + 2.99x_1 + 8.35x_2 + 2.46x_3 + 1.62x_1x_2 + 0.11x_1x_3 + 0.64x_2x_3 + 0.44x_1x_2x_3.$$

Для статистичного аналізу рівняння регресії підраховуємо:

1. Середню дисперсію одиничного значення

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_u s^2\{Y_{ul}\}}{N} = \frac{5367}{8} = 671. \quad (4.7)$$

2. Дисперсія середнього

$$S^2\{\bar{Y}\} = \frac{\sum_u s^2\{Y_{ul}\}}{m \cdot N} = \frac{671}{3} = 224. \quad (4.8)$$

3. Дисперсія коефіцієнтів регресії

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{2} S^2\{\bar{Y}\} = \frac{224}{8} = 28. \quad (4.9)$$

Довірчий інтервал для b_i пределяем за допомогою критерію Зтьюдента. Число ступенів волі тоді $f_t = N - 1 = 7$, рівень ризику оцінюємо 10%, тоді $t_{10\%7} = 1.90$

Коефіцієнт регресії вважається значимим якщо

$$|b_i| > t \cdot \sqrt{S^2\{b_i\}}. \quad (4.10)$$

у цьому випадку

$$t \cdot \sqrt{S^2\{b_i\}} = 1.90 \cdot \sqrt{28} = 10.0.$$

Порівнюючи це значення з коефіцієнтами рівняння регресії бачимо, що всі вони менше критичного значення й лише коефіцієнт x_2 наближається до нього. Із цього випливає, що точність отриманого рівняння недостатня через розкид експериментальних даних. Далі коефіцієнти при факторах x_1 і x_3 майже в три рази менше коефіцієнта при x_2 , що свідчить про занадто малий діапазон змінного тиску (x_1) і зворотно-поступальної швидкості (x_3). На підставі цього були зроблені наступні висновки:

1. Для підвищення стабільності процесу й зменшення впливу побічних факторів необхідно:

- а) знизити вихідну погрішність форми деталей шляхом відбору для дослідів деталей з погрішністю не більш 0,04 мм,

- б) розсортувати деталі по твердості на чотири групи, причому в кожному досвіді використовувати рівне число деталей з кожної групи,
- в) порядок проведення експеримент (досвідів) прийняти випадковим.

2. Для підвищення статистичної вірогідності результатів слід збільшувати число повторення кожного досвіду до восьми.

3. Збільшувати діапазон змінного тиску й зворотно-поступальної швидкості до меж $\frac{x_{max}}{x_{min}} = 2/3$.

4. Для більш точної апроксимації експериментальних даних і обліку не лінійного характеру шуканих залежностей перейти в плані експерименту до логарифмічних координат.

4.2 Результати експериментального дослідження для алмазного хонінгування за планом ПФЕ 24

На підставі попередніх експериментів розроблений план ПФЕ 24 дослідження алмазного хонінгування брусками АСВ І25/І00 МІ 50%, і АСВ І00/80 МІ 50%. Фіксовані вихідні параметри процесу:

- а) величина знімання металу (Δ),
 - б) швидкість знімання (q),
 - в) інтенсивність знімання (b),
 - г) середньоарифметична висота мікронерівностей поверхні деталі (Ra)
- овальність деталей (a).

Змінні фактори x_1, x_2, x_3 ті ж, що й раніше, але до них доданий четвертий фактор x_4 - зернистість, яку можна охарактеризувати одним параметром - середнькубовим розміром зерен D . Згідно з вимірами, для зернистості 125/100, ухвалюємо $D=112$, а для зернистості 100/80, ухвалюємо $D=89$.

Рівні зміни факторів зазначено в таблиці 4.4, причому для наступної оцінки адекватності рівнянь регресії передбачені проміжні рівні змінних.

Таблиця 4.4 - Рівні змінних факторів в основних дослідах

Рівні \ Фактори	Q, кгс/див ² , (МПа)	V _{ок} , м/хв	V _{ос} , м/хв	D, мкм
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Верхній +1	13,6 (1,3 МПа)	83,1	18,3	112
Нижній -1	6,6 (0,6 МПа)	48,2	5,6	89
Проміжний	10,1 (1 МПа)	54,2	11,9	-

Перехід до логарифмічних координат і кодування незалежних змінних виконані по наступних формулах:

$$x_1 = \frac{\lg Q - (\lg Q)_{cp}}{(\lg Q)_{cp} - (\lg Q)_{min}} = 6.361 \cdot \lg Q - 6.21, \quad (4.11)$$

аналогічно для інших факторів:

$$x_2 = 8.40 \cdot \lg V_{ок} - 15.15, \quad (4.12)$$

$$x_3 = 3.89 \cdot \lg V_{ос} - 3.91, \quad (4.13)$$

$$x_4 = 20.0 \cdot \lg D - 40.0. \quad (4.14)$$

Також залежні змінні:

$$y_1 = \lg q, y_2 = \lg b, y_3 = \lg R_a, y_4 = \lg a. \quad (4.15)$$

Матриця планування, результати виміру змінних і їх дисперсії зведено в таблицю 4.5.

Перш, ніж вести регресійний аналіз експерименту, рекомендується перевірити однорідність дисперсії змінних за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S_u^2 \max}{\sum_u S_u^2} \leq G_{кр} \quad (4.16)$$

Якщо нерівність виконується при значенні $G_{кр}$ відповідному обраному рівню значимості (звичайно 0,05), те гіпотеза про однорідність ухвалюється. Числа ступенів волі для критерію Кохрена рівні $f_1=16$, $f_2=7$, причому в цьому випадку аналогічні. Рівень значимості ухвалюємо 0,05, тоді $G_{кр} = 0,1911$.

Обчислюємо відношення Кохрена для параметрів:(швидкість знімання)

$$(\text{швидкість знімання}) G = \frac{0.00827}{0.05650} = 0.1462$$

$$(\text{інтенсивність знімання}) G = \frac{0.00827}{0.05650} = 0.1462$$

$$\text{(шорсткість)} G = \frac{0.00476}{0.02829} = 0.1682$$

$$\text{(округлість)} G = \frac{0.0788}{0.5913} = 0.1355$$

Оскільки всі відносини менше критичного значення, то дисперсії вважаємо однорідними.

Обчислюємо коефіцієнти регресії по формулах (4.6) і знаходимо рівняння регресії в кодованому виді для:

- швидкості знімання металу (4.17)

$$\begin{aligned} y_1 = & 2.246 + 0.0935 x_1 + 0.0910 x_2 + 0.0988 x_3 - 0.0011x_4 \\ & - 0.0076 x_1 x_4 + 0.0226 x_1 x_3 + \\ & + 0.0024 x_2 x_3 - 0.0060 x_1 x_4 - 0.0105 x_2 x_4 + 0.0090 x_3 x_4 \\ & + 0.0242 x_1 x_2 x_3 + 0.0040 x_1 x_2 x_4 - \\ - & 0.0109 x_1 x_3 x_4 - 0.0031x_2 x_3 x_4 + 0.0090 x_1 x_2 x_3 x_4 ; \end{aligned}$$

- інтенсивності знімання (4.18)

$$\begin{aligned} y_2 = & -5.2703 + 0.0917 x_1 - 0.0247 x_2 + 0.0914 x_3 - 0.0036 x_4 \\ & - 0.0054 x_1 x_2 + 0.0202 x_1 x_3 + \\ & + 0.0053 x_2 x_3 - 0.0051x_1 x_4 - 0.0074 x_2 x_4 + 0.0074 x_3 x_4 \\ & + 0.0268 x_1 x_2 x_3 + 0.0033 x_1 x_2 x_4 - \\ - & 0.0083 x_1 x_3 x_4 - 0.0009 x_2 x_3 x_4 + 0.0068 x_1 x_2 x_3 x_4 ; \end{aligned}$$

- середньоарифметичної висоти нерівностей (4.19)

$$\begin{aligned} y_3 = & -0.0001 + 0.0156 x_1 + 0.0028 x_2 - 0.0186 x_3 + 0.0189 x_4 \\ & + 0.0031x_1 x_2 + 0.0064 x_1 x_3 - \\ & - 0.0018 x_2 x_3 + 0.0031x_1 x_4 - 0.0022 x_2 x_4 + 0.0034 x_3 x_4 \\ & + 0.0072 x_1 x_2 x_3 - 0.0058 x_1 x_2 x_4 - \\ - & 0.0019 x_1 x_3 x_4 + 0.0010 x_2 x_3 x_4 + 0.0030 x_1 x_2 x_3 x_4 ; \end{aligned}$$

- овальності деталей (4.20)

$$\begin{aligned} y_4 = & 1.048 + 0.0361x_1 + 0.0194 x_2 - 0.230 x_3 + 0.0598 x_4 \\ & + 0.0002 x_1 x_2 + 0.0029 x_1 x_3 - \\ & - 0.0196 x_2 x_3 + 0.0276 x_1 x_4 - 0.0306 x_2 x_4 + 0.0200 x_3 x_4 \\ & - 0.0100 x_1 x_2 x_3 + 0.0085 x_1 x_2 x_4 + \\ + & 0.0171x_1 x_3 x_4 - 0.154 x_2 x_3 x_4 + 0.0170 x_1 x_2 x_3 x_4 . \end{aligned}$$

Значимість коефіцієнтів регресії знаходимо за допомогою критерію Стьюдента (4.10), для чого по формулах (4.7- 4.9) розраховуємо дисперсії й довірчі інтервали відповідних величин (таблиця 4.5)

Таблиця 4.5 - Дисперсії й довірчі інтервали ($t_{5\%,15} = 2.13$)

Змінна	Дисперсія $S^2_{\{\psi\}}$	$S^2_{\{\psi\}}$	$S^2_{\{\beta\}}$	$t S^2_{\{\beta\}}$
y1	0.00353	0.000441	0.000027 6	0.0112
y2	0.00353	0.000441	0.000027 6	0.0112
y3	0.00177	0.000221	0.000013 8	0.0079
y4	0.0370	0.00462	0.000289	0.0362

Відкинувши несуттєві члени рівнянь, для яких коефіцієнти регресії менше критичного значення, одержимо:

- для швидкості знімання металу (4.21)

$$y = 2.2460 + 0.0935 x_1 + 0.0910 x_2 + 0.0988 x_3 + 0.0226 x_1 x_3 + 0.0242 x_1 x_2 x_3 ;$$

- для інтенсивності знімання (4.22)

$$y_2 = -5.2703 + 0.0917 x_1 - 0.0247 x_2 + 0.0914 x_3 + 0.0202 x_1 x_3 + 0.0268 x_1 x_2 x_3 ;$$

- для середньоарифметичної висоти нерівностей (4.23)

$$y_3 = -0.0001 + 0.0156 x_1 + 0.0186 x_3 + 0.0189 x_4 ;$$

- для овальності деталей (4.24)

$$y_4 = 1.0480 + 0.0361 x_1 + 0.0598 x_4 .$$

Оцінимо адекватність рівнянь регресії за допомогою, додаткового ПФЕ 24 досвідів, поставлених на проміжних рівнях змінних факторів (таблиця 4.5, поз. 17,18).

Розраховуємо дисперсію адекватності по сумі квадратів відхилень розрахункових значень змінних від фактичних

$$S_{ag}^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_u (y_{pac} - \bar{y}_u)^2 . \quad (4.25)$$

Вирішуємо відношення:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2\{\bar{y}\}} . \quad (4.26)$$

Порівнюємо його з табличним значенням критерію Фишера $F_{кр}$. Якщо $F < F_{кр}$ для прийнятого рівня ризику, то гіпотеза адекватності приймаємо. Табличне значення $F_{кр}$ для даних умов рівно $F_{5\%,112,2} = 3.08$ (де: 5% - рівень ризику, 112число ступенів волі для $S^2\{\bar{y}\}$, 2- число ступенів волі для S_{ag}^2). Результати розрахунків (таблиця 4.7) показують, що рівняння регресії (4.21-4.24) адекватно описують процес хонінгування в дослідженій області зміни вхідних факторів.

Таблиця 4.6 - Перевірка адекватності

Змінна	Досвід № 17		Досвід № 18		S_{ag}^2	F
	Розрахунки	Фактич.	Розрахунки	Фактич.		
y1	2.228	2.224	2.228	2.271	0.000933	2.11
y2	-6.779	-6.774	-6.779	-6.821	0.000893	2.02
y3	-0.012	-0.042	0.025	0.042	0.000594	2.68
y4	0.995	1.134	1.114	1.140	0.0100	2.16

Оскільки план експерименту ПФЕ 2^{II} ортогональний, усі коефіцієнти регресії некоррелировані між собою. Це дає можливість, аналізувати процес хонінгування, розглядаючи величину кожного коефіцієнта регресії окремо - незалежно від інших.

Збільшення тиску на бруски (x_1) веде до підвищення швидкості й інтенсивності знімання металу, також зростають шорсткість і овальність деталей. На це вказують позитивні коефіцієнти при x_1 .

Окружна швидкість (x_2) підвищує швидкість знімання металу, однак інтенсивність знімання при цьому знижується. Пояснити цю закономірність можна виходячи з положення про виникнення підвищеного тиску в зоні

різання. Чим більше швидкість різання, тем менше зусилля, що впроваджує зерна в метал і менше інтенсивність знімання. Зниженню інтенсивності знімання сприяє також те, що зі збільшенням $V_{ок}$ зменшується кут схрещування рисок і погіршуються умови зрізання стружки. Швидкість знімання пропорційна інтенсивності знімання й швидкості різання, тому зі збільшенням останньої вона зростає.

На шорсткість і погрішність форми деталей окружна швидкість (x_2) великого впливу не виявляє.

З ростом осьової швидкості хонголови $V_{ос}$ (x_3) інтенсивність і швидкість знімання збільшуються, також підвищується й шорсткість деталі. Такий характер впливу $V_{ос}$ на процес хонінгування зв'язаний зі значними змінами кута схрещування, тому що абсолютна величина швидкості різання мало залежить від $V_{ос}$. Чим вище $V_{ос}$, тим більше кут схрещування, отже, поліпшуються умови абразивного різання, стружка стає дрібніше й легше виходить з-під бруска. Це сприяє росту продуктивності обробки, а залежність знімання від кута схрещування має максимум. Однак у наших досвідах кут α був менш 67, тому максимум не досягався й розглянута залежність монотонно зростаюча.

Рівняння (4.21, 4.22) показують наявність взаємодії тиску швидкості руху хонголови. Це пояснюється в такий спосіб: при великому тиску на бруски ($x_1=+1$) і високої окружної швидкості ($x_2=+1$), зростає тиск у підбрусковому просторі, тому підвищення осьової швидкості руху (x_3) і пов'язане із цим поліпшення виходу шламу з-під бруска повинне в набагато більшому ступені підвищувати знімання, чому при малих значеннях окружної швидкості й тиску.

Рівняння регресії (4.21, 4.22) показують, що в дослідженому діапазоні зернистість, практично, не впливає на знімання металу. Це пов'язане із двома причинами:

1) Гострота зерен брусків АСВ 100/80 більше, чим в АСВ 125/100, що повинне збільшувати інтенсивність знімання.

2) Зазор між зв'язуванням і металом у брусків АСВ 100/80 менше, що утрудняє вихід шламу, збільшує тиск у зоні різання й знижує інтенсивність знімання. Дія цих протилежних тенденцій у даних умовах хонінгування, мабуть, взаємно компенсується.

4.3 Порівняння теоретичних і експериментальних положень

Розглянемо в якому ступені відповідають отриманим експериментальним даним і результати теоретичних досліджень.

Розрахуємо середньоарифметичну висоту мікронерівностей поверхні деталі при хонінгуванні брусками АСВ 100/80 М1 50%.

$$R_a = r_2 \cdot \left(\frac{b \cdot C^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} = 0.32 \cdot \left(\frac{0.0251^{0.59}}{5.39 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{4.78}} \cdot b^{\frac{1}{4.78}} = 10.9 \cdot b^{0.209} \text{ (мкм)}$$

Аналогічно для брусків АСВ 125/100 М1 50%:

$$R_a = 10.1 \cdot b^{0.196} \text{ (мкм)}.$$

Перейдемо до логарифмічних координат і підставимо в ці формули навчання інтенсивності знімання b з рівняння (5.22), тоді:

$$\lg R_a = -0.064 + 0.0192x_1 - 0.0052x_2 + 0.0191x_3 + 0.0042x_1x_3 + 0.0056x_1x_2x_3 \text{ (для АСВ 100/80 М150\%)},$$

$$\lg R_a = 0.027 + 0.0180x_1 - 0.0048x_2 + 0.0179x_3 + 0.0040x_1x_3 + 0.0052x_1x_2x_3 \text{ (для АСВ125/100 М1 50\%)}.$$

Порівнюючи розрахункові значення коефіцієнтів регресії із критичним рівнем значимості (табл. 4.6) бачимо, що всіма взаємодіями можна зневажити.

Об'єднаємо обоє рівняння в одне ввівши четвертий фактор – зернистість брусків x_4 . При цьому нові коефіцієнти регресії перебувають як напівсумавихідних, а коефіцієнт при новому факторові дорівнює напіврізниці вільних членів.

$$y_3 = \lg R_a = -0.0455 + 0.0186x_1 + 0.0185x_3 + 0.0185x_4. \quad (4.27)$$

Зіставляючи (4.27) з рівнянням (4.23), отриманим експериментально, робимо висновок, що розбіжність коефіцієнтів при всіх факторах перебуває в межах випадкових погрешностей. Статистично достовірна, тільки різниця вільних членів, через якої теоретичне значення, у середньому, на 12% менше дійсного. Для наочності на рисунок 4.1. показані теоретична й експериментальна залежності шорсткості від тиску на бруски.

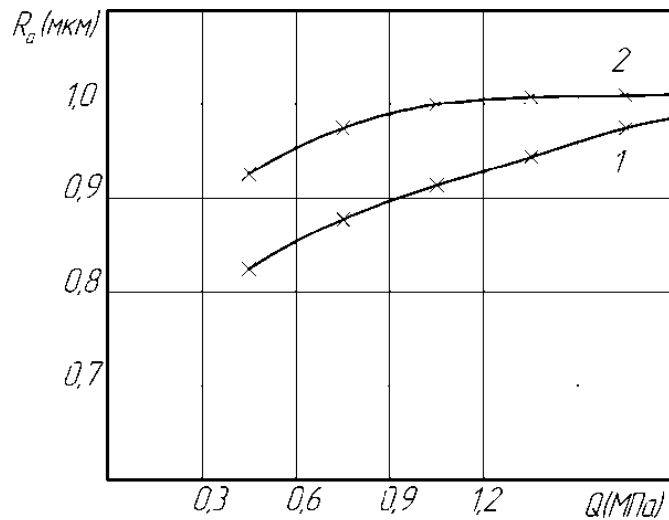


Рисунок 4.1 – Залежність шорсткості Ra від тиску на бруски Q .
(Перетин плану експерименту ПФЕ24 гіперплощиною $x_2=x_3=x_4=0$):

1- теоретична, 2- експериментально.

Випадкова розбіжність пояснюється, впливом пластичного витиснення металу по краях подряпин, яке не враховувалося при теоретичному дослідженні. Однак ця різниця припустима на практиці, тому слід визнати, що отримані теоретичні залежності задовільно узгодяться з експериментальними даними.

Вираження для розрахунків інтенсивності знімання металу залежно від тиску, що впроваджує абразивні зерна в метал, і фізичних характеристик процесу хонінгування

$$b = \left[\frac{Q \cdot C \cdot \frac{m(\beta+3)}{p}}{\pi \cdot r_4 \cdot \delta_s \cdot k \cdot \frac{1-m}{p}} \right]^{\frac{p}{\beta+2m+1}}$$

Знайдемо інтенсивність знімання металу залежно від тиску: Для брусків АСВ100/80 М1 50%:

$$b = \left[\frac{Q \cdot 0.0251^{\frac{(0.59 \cdot 5.19)}{4.78}}}{3.14 \cdot 0.45 \cdot (5.39 \cdot 10^{-9})^{\frac{0.41}{5.1}} \cdot 2 \cdot 10^5} \right]^{\frac{4.78}{4.37}} = 5.02 \cdot 10^{-7} \cdot Q^{1.093}.$$

Для брусків АСВ 125/100 М1 50%:

$$b = \left[\frac{Q \cdot 0.0251^{\frac{(0.55 \cdot 5.55)}{4.78}}}{3.14 \cdot 0.46 \cdot (1.74 \cdot 10^{-9})^{\frac{0.41}{5.1}} \cdot 2 \cdot 10^5} \right]^{\frac{5.1}{4.66}} = 4.18 \cdot 10^{-7} \cdot Q^{1.096}.$$

Перейдемо до логарифмічних координат і введемо перетворення тиску Q (4.11), тоді:

Для брусків АСВ100/80 М1 50%

$$\lg b = -5.230 + 0.172x_1$$

Для брусків АСВ 125/100 М1 50%

$$\lg b = -5.230 + 0.173x_1$$

Або, об'єднавши обоє рівняння, одержимо:

$$y_2 = \lg b = -5.267 + 0.172x_1 - 0.037x_4. \quad (4.28)$$

У той же час, рівняння (4.28) пророкує більш сильний вплив тиску (x_1) і зернистості (x_4), чому в дійсності, і не враховує вплив швидкостей руху (x_2, x_3).

Характер відмінності коефіцієнтів регресії рівнянь (4.28) і (4.22) відповідає положенню про виникнення тиску в зоні різання. При розімкнутих зворотних зв'язках інтенсивність знімання майже прямолінійно залежить від тиску на бруски Q (Рис.4.2., крива 1). Однак, зі збільшенням тиску Q одночасно зростає протитиск шламу й МОР, тому інтенсивність знімання фактично повинна підвищуватися меншою мірою, чому Q . Дані експерименту показують правомірність такого висновку (рис 4.2, крива 2).

У середньому, експериментальні значення інтенсивності знімання на 30% менше розрахункових, відповідних до процесу хонінгування при умовно

розімкнутих зворотних зв'язках. При несприятливих комбінаціях швидкостей руху й тиску на бруски різниця досягає 50%.

Таким чином, проведені експерименти підтверджують закономірність процесу хонінгування й свідчать про наявність значного резерву підвищення ефективності хонінгування за рахунок зменшення шкідливого тиску в підбрусковом просторі.

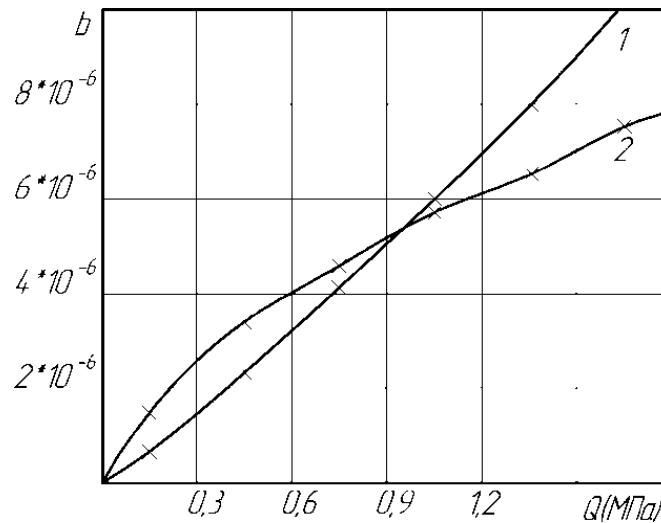


Рисунок 4.2 – Залежність інтенсивності знімання b від тиску набруски Q .

(Перетин плану експерименту ПФЕ24 гіперплощиною $x_2=x_3=x_4=0$).

1- теоретична при умовно розімкнутих зворотних зв'язках, 2- експериментально.

Таблиця 4.7 - Матриця планування, результати виміру змінних і їх дисперсії

П/П	Змінні фактори				Вихідні параметри											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Швидкість змінення \bar{q} , мкм/хв	$y_u = \lg \bar{q}$	Дисперсія $S\{y_{1u}\}$	Інтенсивність змінення \bar{b}	$b = \lg \bar{b}$	Дисперсія $S\{y_{2u}\}$	Порсткість Ra, мкм	$y_u = \lg \bar{R}_a$	Дисперсія $S\{y_{3u}\}$	Овальність \bar{e} , мкм	$y_u = \lg \bar{e}$	Дисперсія $S\{y_{4u}\}$
1	-1	-1	-1	-1	93	1.968	0.00479	3.77×10^{-6}	- 6.576	0.00479	0.89	-0.050	0.00095	9.4	0.973	0.0788
2	+1	-1	-1	-1	143	2.155	0.00551	5.89×10^{-6}	- 6.770	0.00551	0.97	-0.014	0.00113	9.6	0.982	0.0801
3	-1	+1	-1	-1	164	2.215	0.00252	3.86×10^{-6}	- 6.586	0.00252	0.94	-0.027	0.00135	11.1	1.045	0.0580
4	+1	+1	-1	-1	196	2.292	0.00341	4.62×10^{-6}	- 6.665	0.00341	0.90	-0.046	0.00118	13.1	1.127	0.0498
5	-1	-1	+1	-1	126	2.100	0.00263	5.18×10^{-6}	- 6.714	0.00263	0.95	-0.022	0.00198	7.4	0.870	0.0408
6	+1	-1	+1	-1	229	2.360	0.00152	8.73×10^{-6}	- 6.942	0.00152	1.07	+0.033	0.00064	8.5	0.930	0.0576
7	-1	+1	+1	-1	203	2.308	0.00224	4.68×10^{-6}	- 6.670	0.00224	0.94	-0.027	0.00108	10.8	1.033	0.0215
8	+1	+1	+1	-1	380	2.580	0.00080	8.76×10^{-6}	- 6.943	0.00080	1.01	0.004	0.00055	8.9	0.950	0.0452
9	-1	-1	-1	+1	88	1.944	0.00537	3.57×10^{-6}	- 6.553	0.00537	0.93	-0.031	0.00222	11.1	1.045	0.0144
10	+1	-1	-1	+1	147	2.168	0.00197	5.95×10^{-6}	- 6.774	0.00197	1.05	-0.022	0.00291	13.5	1.130	0.0258

П/П	Змінні фактори				Вихідні параметри											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Швидкість змінання \bar{q} , мкм/хв	$y_u = \lg \bar{q}$	Дисперсія $S\{y_u\}$	Інтенсивність змінання \bar{b}	$\bar{b} = \lg \bar{b}$	Дисперсія $S\{y_u\}$	Шорсткість Ra, мкм	$y_u = \lg R_a$	Дисперсія $S\{y_u\}$	Овальність \bar{e} , мкм	$y_u = \lg \bar{e}$	Дисперсія $S\{y_u\}$
11	-1	+1	-1	+1	151	2.179	0.00075	3.56×10^{-6}	- 6.552	0.00075	0.99	-0.004	0.00292	12.3	1.090	0.0304
12	+1	+1	-1	+1	181	2.258	0.00763	4.27×10^{-6}	- 6.630	0.00763	1.00	0.000	0.00260	15.1	1.180	0.0399
13	-1	-1	+1	+1	160	2.204	0.00805	6.10×10^{-6}	- 6.786	0.00805	1.06	+0.026	0.00123	12.1	1.083	0.0076
14	+1	-1	+1	+1	220	2.342	0.00827	8.30×10^{-6}	- 6.920	0.00827	1.14	+0.056	0.00476	16.6	1.220	0.0125
15	-1	+1	+1	+1	201	2.303	0.00049	4.64×10^{-6}	- 6.667	0.00049	1.02	+0.009	0.00214	9.1	0.960	0.0057
16	+1	+1	+1	+1	366	2.562	0.00055	8.45×10^{-6}	-- 6.927	0.00055	1.18	+0.072	0.00064	14.4	1.158	0.0232
17	+0,18	- 0,60	+0,20	-1	168	2.224	-	5.95×10^{-6}	- 6.774	-	0.91	-0.42	-	13.6	1.134	-
18	+0,18	- 0,60	+0,20	+1	187	2.271	-	6.63×10^{-6}	- 6.821	-	1.10	+0.042	-	13.8	1.140	-

4.4 Результати випробувань хонінгувальних брусків з переривчастою робочою поверхнею

Теоретично проаналізована можливість зниження тиску шламу й МОР у зоні різання шляхом нанесення канавок на робочу поверхню хонінгувальних брусків. З метою перевірки ефективності брусків з переривчастою робочою поверхнею в технологічному процесі нами були проведено на ВАТ «59 Арсенал» дослідження з хонінгування чавунних гільз до двигуна Камаз 740.

Випробовувалися абразивні бруски КЗ 10 СТ1 К и алмазні бруски АСВ 160/125 МІ/Сu 50% при хонінгуванні гільз із загартованого сірого чавуну на СЧ25 ГОСТ 1412-85, а також алмазні бруски АСВ 125/100 МІ 50% і АСВ 100/80 МІ 50% при хонінгуванні гільз із незагартованого чавуну.

Обробка велася на вертикально-хонінгувальному верстаті ЗМ83. Режими хонінгування були однаковими для всіх видів брусків. Окружна швидкість обертання хона $V_{\text{окр}} = \frac{63\text{м}}{\text{хв}}$, $V_{\text{в-п}} = \frac{15,5\text{м}}{\text{хв}}$, тиск $P = 1,4$ МПа. Переривчаста поверхня на брусках створювалася шляхом прорезки канавок дисковим алмазним колом ЭБ 16 СТ В, шириною 2 мм. Кількість канавок на одному бруску - 5, кут нахилу до осі бруска - 45° (Рис. 4.3)

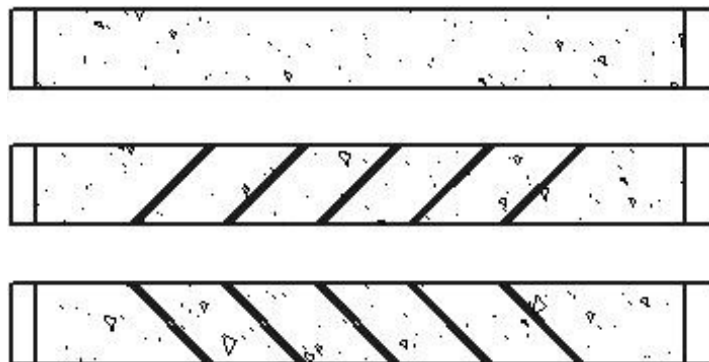


Рисунок 4.3 - Абразивні й алмазні хонинговальные бруски (з канавками й без).

Для більш точного визначення ступеня впливу переривчастої поверхні на процес хонінгування й зменшення випадкових погрішностей, пов'язаних з нестабільністю брусків, був розроблений поетапний план:

- а) Підготовка комплекту брусків з канавками й без.
- б) Обробка пари деталей хонінгувальними брусками без канавок із заданими режимами обробки.
- в) Обробка пари деталей хонінгувальними брусками з канавками із заданими режимами обробки.
- г) Порівняння отриманих даних.

Вірогідність отриманих даних по впливу переривчастої поверхні брусків на технологічні параметри процесу оцінювали за допомогою критерію Стьюдента:

$$t_f = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{n_1 \cdot S_x^2 + n_2 S_y^2}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

\bar{y}, \bar{x} – значення технологічного параметра для суцільних і переривчастих брусків.

n_1, n_2 – число вимірів при накладенні середнього значення параметра,

$f = (n_1 + n_2 - 2)$ – число ступенів волі.

За значеннями t_f за допомогою таблиць [115] знайдені довірчі імовірності P , того, що різниця величин $(\bar{y} - \bar{x})$ істотна, а не випадкова. Довірчі ймовірності також занесено в таблицю 4.8.

Швидкість знімання металу переривчастими брусками виявилася вище, чим суцільними. Найбільший ефект спостерігався при чорновому хонінгуванні гільз із незагартованого сірого чавуну алмазними брусками АСВ 125/100 МІ 50%.

Одночасно зі збільшенням продуктивності обробки значно зросла точність форми деталей, особливо при чорновому алмазному хонінгуванні. Пояснюється цей факт декількома причинами.

Усунення вихідної погрішності форми деталей при хонінгуванні відбувається за рахунок підвищення тиску брусків і, отже, швидкості знімання в місцях звуження деталі. Але швидкість знімання залежить від різниці тиску, прикладеного до бруска ззовні, і тиску шламу й МОР у зоні різання, тому в брусків з переривчастою поверхнею коливання зовнішнього тиску більшою мірою змінює швидкість знімання, за рахунок чого відбувається більш інтенсивне виправлення погрішності форми деталей.

Другий фактор, що впливає на точність, це теплові деформації деталі при обробці. Бруски з переривчастою поверхнею мають краще охолодження, крім того, зменшується тепловиділення, що виникає при терті шламу про робити й зв'язування бруска, тому теплові деформації також зменшуються.

Усе це приводить як до зменшення середнього значення погрішності, так і до зниження поля її розсіювання (Рисунок 4.4, 4.5). У двох випадках (чорнове хонінгування абразивними брусками й чистове хонінгування алмазними) підвищення точності обробки було невеликим. Це пов'язане із сильним нагріванням деталей при чорновому абразивному хонінгуванні загартованого чавуну й малим припуском на чистове алмазне хонінгування.

Переривчасті бруски дозволяють більш раціонально використовувати припуск Δ , що можна бачити по зміні коефіцієнта використання припуску (таблиця 4.8)

$$k_{u.n} = \frac{e_1 - e_2}{\Delta},$$

Де e_1 і e_2 - овальність деталі до й послі обробки.

Проведені дослідження дозволили рекомендувати алмазні бруски з переривчастою поверхнею до промислового застосування.

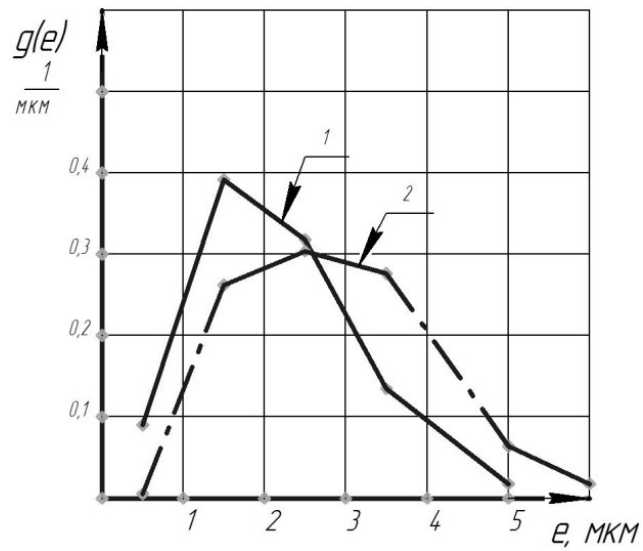


Рисунок 4.4 - Щільність розподілу гільз по овальності після хонінгування брусками АСВ 160/125 МІ/Сu 50%.

(1 - бруски переривчасті; 2 - бруски суцільні)

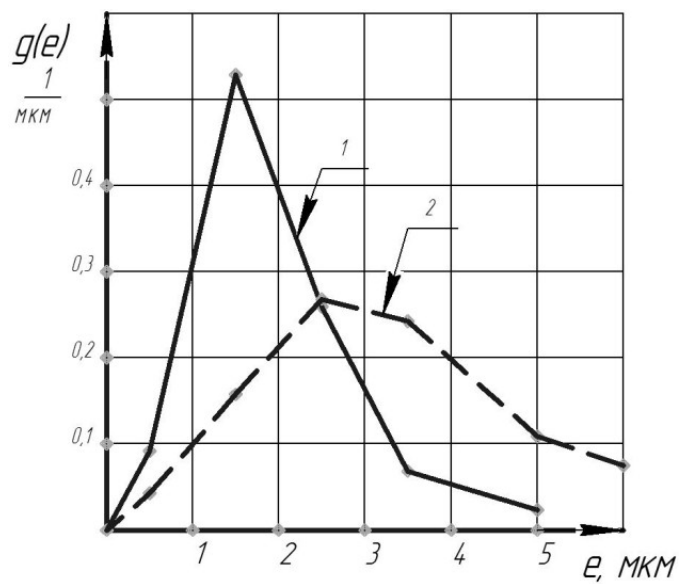


Рисунок 4.5 - Щільність розподілу гільз по овальності після хонінгування брусками АСВ 125/100 МІ 50%.

(1 - бруски переривчасті; 2 - бруски суцільні)

Таблиця 4.8 - Порівняння деяких технологічних показників при обробці суцільними й переривчастими брусками

№ п/п	Показники, Бруски	КЗ 10 СТІ ДО (чорнове хонінгування)	АСВ 160/125 МІ/Сu 50% (чорнове хонінгування)	АСВ 125/100 МІ 50% (чорнове хонінгування)	АСВ 100/80 МІ 50% (чистове хонінгування)
1.	Вихідний стан деталей:				
1.1	Матеріал деталі	Чавун сірий, Загартований	Чавун сірий, Загартований	Чавун сірий, легований	Чавун сірий, легований
1.2	Попередня обробка	розточування	розточування	розточування	Чорнове хонінгування
1.3	Шорсткість	<i>Ra3.2</i>	<i>Ra3.2</i>	<i>Ra3.2</i>	<i>Ra1.6</i>
1.4	Овальність (мкм)	60	60	60	30
2.	Режим обробки:				
2.1	Q (МПа)	0.51	0.93	0.62	0.62
2.2	V _{ок} (м/хв)	53,0	60,0	53,0	53,0
2.3	V _{ос} (м/хв)	11,0	11,0	15,6	11,3
3.	Швидкість знімання <i>q</i> (мкм/хв):				
3.1	Суцільними брусками	163	136	54	77
3.2	Переривчасті бруски	179	148	68	86
3.3	Збільшення продуктивності (%)	10,0	8,8	25,9	11,7
3.4	Довірча ймовірність <i>P</i>	0,95	0,96	0,99	0,99
4.	Овальність деталі до й після обробки <i>e</i> (мкм):				
4.1	Суцільні бруски	59,3/28,8	59,1/30,3	58,4/33,2	27,7/22,3
4.2	Переривчасті бруски	75,1/25,4	59,5/20,8	52,8/19,4	29,1/20,7
4.3	Зниження овальності (мкм)	3,4	9,5	13,8	1,6
4.4	Довірча ймовірність <i>P</i>	0,82	0,99	0,99	0,76

№ п/п	Показники, Бруски	КЗ 10 СТІ ДО (чорнове хонінгування)	АСВ 160/125 МІ/Сu 50% (чорнове хонінгування)	АСВ 125/100 МІ 50% (чорнове хонінгування)	АСВ 100/80 МІ 50% (чистове хонінгування)
5.	Коефіцієнт використання припуску $K_{и.п.}$				
5.1	Суцільні бруски	0,31	0,24	0,28	0,16
5.2	Переривчасті бруски	0,46	0,3	0,33	0,33

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

5.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності

Всі дослідницькі роботи, представлені в даній роботі, проводилися в металообробних лабораторіях. У зв'язку з цим необхідно передбачити створення сприятливих умов для проведення експериментів на робочому місці.

Створення комфортних метеоумов. Мікроклімат на робочому місці в приміщенні лабораторії нормується з урахуванням температури повітря, його відносної вологості і швидкості руху. Основним показником є температура; вологість і вентиляція - супутні показники, що підсилюють її дію. Рекомендується періодично коригувати параметри системи опалення з урахуванням пори року [49]. Регулювання повітряного середовища здійснюється за допомогою вентиляції. Для зменшення рухливості повітря усуваються можливі причини виникнення протягів (відкриті кватирки, зазори між рамами тощо.).

Умови освітлення. Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і працездатності очей. Для створення природного освітлення в приміщенні використовують світлові прорізи в стінах (вікна). Електричне освітлення необхідно для проведення робіт в темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення. У якості штучних джерел світла рекомендується використовувати лампи розжарювання і люмінесцентні лампи. Приймаємо освітлення двох видів: робоче (для проведення робіт в звичайних умовах) і аварійне (для тимчасового продовження робіт або евакуації працюючих при раптовому відключенні робочого освітлення) [49, 50]. Аварійне освітлення передбачається з незалежним джерелом живлення або при автоматичному перемиканні на нього у випадку аварії.

Захист від шуму. При проведенні металографічних досліджень використовується різне обладнання (шліфувальні і полірувальні верстати, електронний мікроскоп), експлуатація якого супроводжується шумом. Шум викликає зміни в нервовій системі, впливає на психіку людини, серцево-судинну систему, погіршує сон [48 – 52]. Робота в умовах постійного шуму може викликати головний біль, запаморочення, ослаблення уваги. Шум є причиною швидкого розвитку втоми і зниження працездатності. Встановлений в лабораторії рівень звукового тиску при частоті 1000 Гц складає 60 дБ - при шумі, що виникає всередині приміщення, і 45 дБ - при шумі, проникаючому ззовні [51]. Для захисту від шумових впливів застосовують звукоізолюючі огорожі установок, які відображають більшу частину світлової енергії, що падає на них. Наприклад, верстати розташовуються в місцях, відгороджених глухими перегородками від решти лабораторії. Також для зниження шуму агрегатів використовують звукоізолюючі кожухи, в які укладають їх шумливі вузли. Люди, які безпосередньо працюють біля верстатів, повинні використовувати спеціальні вкладиші, типу беруші.

Захист від шкідливих речовин і пилу. При проведенні дослідницьких робіт виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що застосовуються в роботі. Всі забруднюючі повітря речовини надають шкідливої дії, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину; але навіть і в менших кількостях вони шкідливі, якщо знаходяться в організмі в незвичайних концентраціях або станах. Також при роботі може виникнути і безпосередній контакт зі шкідливими речовинами. При шліфуванні і поліруванні зразків повітря забруднюється металевим пилом. У зв'язку з багатокомпонентним складом досліджуваної сталі забруднення повітря може викликати різні реакції. Ряд металів (хром в даній сталі) може привести до алергічних захворювань - бронхіальна астма, ураження шкіри, очей, носа тощо [51 – 52]. Багато металу, в тому числі, залізо, ванадій, молібден, кремній, марганець, а також фосфор є біологічними мікроелементами, що знаходяться в крові, печінці, м'язах в дуже невеликих

кількостях (10^{-3} - $10^{-2}\%$) [52]. Недолік або надлишок мікроелементів у порівнянні з нормальним вмістом призводить до порушень тих чи інших функцій організму. Для запобігання розповсюдження пилу дослідна лабораторія розташовується в окремому приміщенні, ізольованому дверима від сусідніх робочих місць. Також передбачене регулярне вологе прибирання для видалення осілих частинок пилу. При проведенні робіт виникає необхідність в застосуванні хімічних сполук різної небезпеки, зокрема для травлення зразків (трихлористе залізо, пікринова кислота). Для захисту від шкідливих випарів передбачена місцева витяжна вентиляція, призначена для видалення забрудненого повітря безпосередньо від джерела утворення виділень. Даний вид вентиляції представлений в лабораторіях у вигляді укриттів і витяжних шаф. Для очищення повітря від шкідливих виділень і продуктів дихання людей передбачена загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція, повітря для якої забирається з чистої зони. Додатково використовуються засоби індивідуального захисту. Для захисту рук при роботі з травителями застосовують кислототривкі рукавички, які повинні тісно прилягати до шкіри.

Захист від електричного струму. Причинами ураження електричним струмом є зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і проводами; дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена; дотик до струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції; дотик до металевих частин обладнання, випадково опинилися під напругою [49 – 52]. Небезпека електричних поразок створює працююче від мережі обладнання, освітлювальні прилади і електрична проводка. Дія електричного струму на організм може викликати різні електричні травми (електричний опік, металізацію шкіри, електричний знак та ін.), тому передбачають заходи захисту від ураження електричним струмом. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. Для захисту від дотику здійснюють недоступне розташування струмоведучих частин (на висоті, під підлогою або приховано в стінах). Незахищені струмоведучі частини, до яких можливий дотик людей надійно захищають. Застосовувані проводи та кабелі повинні

відповідати умовам експлуатації обладнання. Для виключення мережі при короткому замиканні використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, настановні автомати і плавкі запобіжники. Для захисту працюючого в разі дотику до металевих частин електричної установки, випадково опинилися під напругою, застосовують захисне заземлення.

Захист від електромагнітних випромінювань. Виникаючі при використанні струмів високої частоти електромагнітні поля різних частотних діапазонів представляють певну професійну шкідливість, тому необхідно вживати заходів щодо захисту від їх впливу на організм. Надійним методом захисту є екранування [50]. Металеві частини установок і систем водоохолодження заземляють, щоб не допустити ураження струмом. Проводи, кабелі та інші струмопровідні частини огорожують. Повинна бути виключена можливість їх нагріву. Передбачають пристрої (рубильники, вимикачі), що забезпечують відключення від мережі. Обов'язкова загальна вентиляція приміщень (з витяжкою з верхньої зони приміщення в робочу зону). Приміщення високочастотних установок забороняється захищувати металевими предметами. Повинні бути дотримані вимоги електробезпеки.

Захист від пожежі. Пожежі становлять значну небезпеку, так як заподіюють великі пошкодження і матеріальний збиток, тому запобігання пожеж є важливим завданням. Для зменшення небезпеки виникнення і поширення пожеж велике значення має раціональне пристосування і розташування лабораторій і виходів з них [52]. Обов'язкова наявність вентиляції, так як її відсутність може стати причиною задимлення приміщень і ускладнює боротьбу з пожежею. У вентиляційних пристроях не повинен накопичуватися пил; швидкість руху повітря повинна бути такою, щоб зважені в повітрі частки не осідали. Обов'язкова наявність повідомлюючої пожежної сигналізації в будівлі. Кожна лабораторія повинна бути оснащена вогнегасником для усунення пожежі, що починається. У будівлі забезпечують можливість швидкої безпечної евакуації людей у разі виникнення загоряння. З коридору рекомендується проектувати, як правило, не менше двох

евакуаційних виходів. Пожежну небезпеку можуть представляти електричні пристрої в разі перевантаження або короткого замикання. Для запобігання цього необхідні: правильний монтаж і експлуатація мереж і агрегатів, дотримання правил їх експлуатації.

5.2 Вимоги перед початком робіт

1. Упорядкувати робочий одяг, взуття, засоби індивідуального захисту. Рукава необхідно застібнути, волосся прибрати під головний убір.

2. Приготувати гачок для видалення стружки.

3. Перевірити наявність і справність:

- Огородження зубчатих коліс, привідних ременів, приводів, а також струмоведучих частин електричної апаратури.

- Захисного заземлення.

- Запобіжних пристроїв для захисту від стружки, охолоджуючих рідин.

- Пристрою для кріплення інструменту, деталей.

- Ріжучого, вимірювального інструменту, засобів.

4. Перевірити верстат на холостому ході:

- Справність органів керування (механізмів головного руху, подачі, пуску, зупинки руху та інше).

- Справність фіксації важелів включення і переключення.

- Відсутність заїдань та надмірної слабини в рухомих частинах верстата - шпинделя, подовжніх і поперечних полозків.

5. Перевірити правильність заточування інструменту.

6. Розкласти інструмент, пристосування в зручному для користування порядку.

7. Відрегулювати місцеве освітлення.

5.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи.

1. Під час встановлення свердел та інших різальних інструментів та пристроїв у шпиндель верстата необхідно звертати особливу увагу на міцність

їх закріплення і точність центрування.

2. Стружку з просвердлених отворів необхідно видаляти гідравлічним способом, магнітами, металевими гачками тощо – тільки після зупинення верстата та відведення інструмента.

3. Усі оброблювані на верстаті деталі, крім особливо важких, необхідно установлювати у відповідні пристосування (лещата, кондуктори тощо), які закріплюються на столі (плиті) свердлильного верстата, і кріпити в цих пристосуваннях.

4. Для знімання інструменту з верстата необхідно застосовувати спеціальні молотки та вибивачі, виготовлені з матеріалу, від якого під час удару не відділяються частинки.

5. Шпиндель з патроном повинен самостійно повертатися у верхнє положення при відпусканні штурвала подачі свердла.

6. Забороняється:

- Використовувати на верстатах інструмент із забитими або спрацьованими конусами та хвостовиками.

- Працювати на свердлильних верстатах у рукавицях, рукавичках або із забинтованими руками.

- Утримувати виріб руками під час роботи.

- Перевіряти рукою гостроту різальних кромek інструмента, глибину отвору та вихід свердла із отвору в деталі, а також охолоджувати свердла мокрою ганчіркою під час роботи верстата.

7. Під час роботи не можна близько нахилитися до шпинделя і ріжучого інструменту.

8. Щоб уникнути вильоту деталі, яка обробляється, деталь, лещата і пристосування повинні бути міцно закріплені на столі або фундаментній плиті. Кріплення виконується спеціальними кріпильними деталями: болтами, які відповідають пазу стола, притискними планками, упорами та інше.

9. Лещата повинні бути справними, а насічка губок неспрацьована.

10. Установку деталей на верстаті і їх знімання з верстата необхідно виконувати

тільки тоді, коли шпindel з ріжучим інструментом знаходяться у вихідному положенні.

11. Вставляти чи виймати свердло або інший інструмент із шпинделя верстата дозволяється тільки після повного припинення обертання шпинделя.

Свердло із шпинделя необхідно виймати спеціальним клином, який не повинен залишатись у пазу шпинделя.

12. Маса і габаритні розміри деталі, яка обробляється, повинні відповідати паспортним даним верстата. Важкі деталі необхідно встановлювати і знімати за допомогою механізмів.

13. Звільняти деталь від строповки дозволяється після надійної установки і закріплення.

14. Не дозволяється свердління тонких пластинок, смуг чи інших подібних деталей без кріплення в спеціальних пристосуваннях.

15. Якщо виріб обертається на столі разом з свердлом, необхідно зупинити верстат і зробити необхідні поправки.

16. Під час свердління глибоких отворів необхідно виводити свердло з отвору для видалення стружки.

17. Свердлими отвори у в'язких металах необхідно спіральними свердлами зі стружкодробильними каналами.

18. Ріжучий інструмент необхідно підводити до оброблювальної деталі поступово і плавно, без ударів.

19. Під час ручної подачі свердла і при свердлінні дрібними свердлами не можна дуже сильно натискувати на важіль.

20. Не дозволяється направляти стружку на себе; стружку, яка намотується на оброблювану деталь і ріжучий інструмент, необхідно видаляти спеціальним інструментом при непрацюючому верстаті.

21. При свердлінні крихких металів, якщо на верстаті відсутні захисні пристосування, необхідно користуватися захисними окулярами або запобіжним щитком з прозорого матеріалу.

22. Верстат необхідно зупинити у разі:

- відходу від верстату;
- тимчасового припинення роботи;
- прибирання, змащення, чистки верстата;
- підтягування болтів, гайок та інших з'єднувальних деталей верстата;
- установки, вимірювання, заміни деталі.
- перевірки і зачистці ріжучої кромки інструменту;
- зняття і натягнення ременів шківа верстата.

5.4 Вимоги безпеки після виконання роботи

1. Вимкнути верстат, відключити його від електромережі.
2. Упорядкувати робоче місце, прибрати з верстата стружку, пристосування, очистити верстат від бруду, витерти і змастити частини, що труться; скласти готові деталі і заготовки.
3. Прибрати інструмент у відведене для нього місце.
4. Зняти спецодяг, помити обличчя, руки водою з милом.

5.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

1. Негайно зупинити верстат, відключити електроенергію, огородити небезпечну зону, не допускати сторонніх осіб в небезпечну зону.
2. Повідомити про те, що сталося, керівника робіт.
3. Якщо є потерпілі, необхідно надавати їм першу медичну допомогу; при необхідності, викликати швидку медичну допомогу.
4. Послідовність надання першої допомоги:
 - припинити дію на організм факторів, що спричинили нещасний випадок, які загрожують здоров'ю чи життю потерпілого (звільнити від дії електричного струму, винести з зараженої зони, загасити одяг, що спалахнув, витягти з води) і оцінити його стан;
 - визначити характер і важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого, послідовність заходів по його рятуванню;

- вжити необхідних заходів по рятуванню потерпілого в порядку першочерговості (відновити проходимість дихальних шляхів, провести штучне дихання, зовнішній масаж серця, зупинити кровотечу, накласти пов'язку тощо);

- викликати швидку допомогу чи лікаря або вжити заходів для відправки потерпілого в найближчий медичний заклад;

- підтримувати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичної допомоги.

5. У разі виникнення пожежі викликати пожежну частину та приступити до гасіння її наявними засобами пожежогасіння.

6. Виконувати всі вказівки керівника робіт по ліквідації небезпеки.

ВИСНОВКИ

1. Складена структурна схема процесу хонінгування, що відбиває взаємозв'язок основних фізичних явищ і технологічних параметрів. На схемі показано, зокрема, що поряд із процесом впливу хонінговальних брусків на поверхню оброблюваної деталі виникають зворотні зв'язки між вихідними факторами й зусиллям притиску брусків до деталі, що впливає на ефективність і якість обробки.

2. Виконано математичний опис мікрогеометрії абразивних інструментів за допомогою дискретної й безперервної моделей, знайдений математичний зв'язок між ними. Дискретна модель більш реально відбиває будову абразивного інструмента, але використання її утруднене через відсутність зручних експериментальних методів визначення її параметрів.

3. Встановлена математична залежність між законом розподілу абразивних зерен по висоті ріжучого шару інструмента й законом розподілу глибини подряпин, нанесених даним інструментом на поліровану поверхню. З використанням цієї залежності розроблена методика дослідження закону розподілу абразивних зерен по висоті ріжучого шару інструмента. Запропонована методика проста в здійсненні й має достатню точність.

4. Визначені параметри закону розподілу по висоті й форми профілю абразивних зерен хонінговальних брусків марок: АС 200/160 МІ/Сu 50%; АСВ 125/100 МІ 50%; АСВ 100/80 МІ 50%. Також визначені пружні властивості брусків і встановлене, що при хонінгуванні незагартованого чавуну деформації інструмента невеликі й, у першому наближенні, їх можна не враховувати в теоретичних розрахунках.

5. Встановлено, що при хонінгуванні в підбрусковому просторі виникає підвищений тиск шламу й МОР, що створює зворотні зв'язки між зусиллям притиску брусків і вихідними факторами та має значний вплив на процес обробки.

6. Представлені фізичні механізми підвищеного тиску в

підбрускового просторі:

- а) підвищення тиску шламу за рахунок опору його руху в підбрусковому просторі, створюваного нерівностями зв'язування й виступаючими з неї абразивними зернами,
- б) виникнення гідродинамічного клина при плинні МОР у підбрусковому просторі, причиною якої є деформаційний поворот брусків у корпусі хонінговальної голівки під дією окружної сили різання;
- в) виникнення в'язкісного клина внаслідок змінних температур і в'язкості МОР, що рухається в підбрусковому просторі.

7. Встановлений вплив на продуктивність і якість хонінгування різних фізичних факторів, зокрема: швидкості різання, в'язкості МОР, характеристик брусків, питомого тиску на бруски й ін. Показане, що існують граничні значення швидкості різання й ширини суцільних брусків, які залежать від умов обробки й перевищення яких зменшує швидкість знімання металу.

8. Показана доцільність зменшення площі суцільного контакту брусків з деталлю шляхом нанесення канавок на робочу поверхню, що дозволяє знизити тиск шламу й МОР у підбрусковому просторі й підвищити ефективність і якість обробки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фрагин И.Е. О сущности явлений в контакте хонинговального бруска и обрабатываемой детали. Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин», Москва, 1973. - С. 64.
2. Окамура К., Накадзима Т. Теория шлифования на основе явления переходного резания, «Сэймицу кикай», т. 36, №3, Япония, 1970. - С. 75-76.
3. Nakayama K. Taper print method for the measurment of grinding weel surface, «Bull. Jap. Soc. Precis. Eng.», 7, №2, 1973. - С. 35-37.
4. Сагарда А.А., Корж Н.Я., Химач О.В., Костенецкий Г.Д., «Обрабатываемость чугунов при алмазном шлифовании», «Синтетические алмазы», вып. 6, 1973. - С. 65-72.
5. Протодьяков М. М., Теред Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. - М.: Наука, 1996. - 74 с.
6. Патент РФ № RU 2305620. Способ обработки отверстий. / Полянчиков Ю.Н., Полянчикова М.Ю., Курсин О.А., Кожевникова А.А. - Опубликовано 10.09.2007г. Бюллетень № 25.
7. Савицкая Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. — 3-е изд., перераб. и доп. - М.: ИНФРА-М, 2005. - 425 с.
8. Alden G.J. Operations of grinding wheel in machine grinding, «Trans. Am. Soc. mech. Engrs.», №36, 1914. – С. 134-143.
9. Исследования теории шлифования. «Нихон кикай гаккай си», т. 73, № 615, 1970. – С. 73-82. (Перевод ВИНТИ № 91384/1).
10. Пекленик Ж., К вопросу применения корреляционной теории к процессу шлифования, «Конструирование и технология машиностроения», №2, 1964. – С. 33-38.
11. Филимонов Л.Н. О роли рельефа рабочей поверхности круга в процессе шлифования, «Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки», 1974 – С. 12-23.
12. Аврутин Ю.Д. Описание рельефа рабочей поверхности шлифовального

- круга и анализа процесса формирования рельефа шлифовальной поверхности. «Труды ВНИИАШ», №14, 1973. С. 35-47.
13. Куликов С. И., Романчук В. А., Ризванов Ф. Ф., Евсеев Ю. М. Хонингования. Справочное пособие. - М.: Машиностроение, 1973 г. - 168с.
 14. Yong Huang, Steven Y. Liang. Cutting temperature modeling based on non-uniform heat intensity and partition ratio // Machining Science and Technology. - Vol. 9, Iss. 3, 2005. - P. 301 - 323. США.
 15. Авторское свидетельство СССР № SU 1166974. Спосіб хонінгування отворів деталей. / Бутенко В. И., Чистяков А. В. - Опубликовано 15.07.1985 г. - Бюллетень № 26.
 16. Neu Superfinishbearbeitungsmaschine Supermat - 808, Vaschine und Werkzeug, 2005. -V. 106, N.10. - S. 103. Герм. -№3.
 17. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей — Рига: Зинатие, 1975. - 210 с.
 18. Патент РФ № RU 2086395. Способ изготовления абразивных изделий. / Оробинский В. М., Полянчиков Ю. Н., Курченко А. И., Банников А. И., Головкин А. Г., Бобынин Ю. В. - Опубликовано 10.08.1997 г.
 19. Полянчиков Ю.Н., Полянчикова М.Ю., Кожевникова А.А., Каленский К.В. Влияние характеристик абразивного инструмента на уменьшение технологической наследственности при хонинговании. // Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2006. - № 2. - С. 54 - 56.
 20. Полянчиков Ю. Н., Секачѳв С. А., Курченко А. И., Поступаев Ю. Н. Оптимизация процесса хонингования путѳм применения комбинированного абразивного инструмента без связки. // Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2003. - № 2. - С. 59 - 62.
 21. Полянчиков Ю. Н., Тибиркова М. А. Особенности износа однокомпонентного абразивного инструмента. // Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2004. - № 2. — С. 53 — 55.
 22. Бабичев А. П. Хонінгування. - М.: Машиностроение, 1965. - 97 с.

23. Патент РФ № RU 2169067. Способ изготовления абразивного изделия. / Бабичев И. А., Бабичев А. П., Тамаркин М. А., Мельникова Е. П., Кожухова А. В., Бойко М. А. - Опубликовано 20.06.2001 г.
24. Авторское свидетельство СССР № SU 1268328. Способ электрохимического хонингования. / Зайцев В.И., Климов С.А., Гучек Н.Е., Шелиспанский Б. Л. - Опубликовано 07.11.1986 г. - Бюллетень № 41.
25. Авторское свидетельство СССР № SU 1425004. Способ электрохимического хонингование фасонных поверхностей. / Климов С.А., Зайцев В. И., Боев В. И., Шелиспанский Б. Л., Щуплов М. В. — Опубликовано 23.09.1988 г. - Бюллетень № 35.
26. Авторское свидетельство СССР № SU 1547979. Головка для электрохимического хонингования. / Зайцев В. И., Климов С. А., Мошев А. С., Честюнин С. В., Шелиспанский Б. Л., Щуплов М. В. — Опубликовано 07.03.1990 г. - Бюллетень № 9.
27. Полянчиков Ю. Н., Гильдебранд Л. Г., Полянчикова М. Ю., Баранов П. В. Хонінгування високоточних глухих отворів //Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2004. - № 2. - С. 40 - 41.
28. Куликов С. И., Ризванов Ф. Ф., Романчук В. А., Ковалевский С. А. Прогрессивные методы хонингования. -М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
29. Патент РФ № RU 2000129892. Способ хонингования глубоких отверстий в деталях. / Чирков Г. В. — Опубликовано 27.10.2002 г. — Бюллетень № 28.
30. Чирков Г. В. Технология получения высококачественных поверхностей в глубоких отверстиях изделий. // Технология машиностроения. - М.: Машиностроение, 2007. - № 7. - С. 23 -25.
31. Чирков Г. В. Хонинговальная головка для обработки глубоких отверстий деталей. // Технология машиностроения. - М.: Машиностроение, 2003. - №3.-С. 10- 11.
32. Шпура Г., Штеферле Т. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х книгах. Кн. 2 / Пер. с нем. под ред. Соломенцева Ю. М. - М.: Машиностроение, 1985. - 688 с.

33. Патент РФ № RU 2155123. Способ хонингования. / Степанов Ю. С., Афанасьев Б. И., Бородин В. В., Подзолков М. Г., Рыбкин В. Г. - Опубликовано 27.08.2000 г. — Бюллетень № 36.
34. Степанов Ю. С., Комаров В. А., Афанасьев Б. И., Поляков А. И. Повышение производительности внутреннего шлифования с одновременным снижением износа шлифовальных кругов. // Станки и инструменты. — М.: Машиностроение, 2005. - № 8. - С. 33-35.
35. Стратиевский И. Х. Моделирование процессов абразивной обработки. // Metalloobrabotka. - СПб.: Политехник, 2002. - № 4.
36. Бабаев С. Г., Мамедханов Н. К., Гасанов Р. Ф. Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий. - М.: Машиностроение, 1978. - 103с.
37. Патент РФ № RU 2108902. Хонинговальная головка. / Оробинский В. М., Полянчиков Ю.Н., Курченко А. И., Головкин А. Г., Бобынин Ю. В. — Опубликовано 20.04.1998 г., Бюллетень № 11.
38. Авторское свидетельство СССР № SU 1171292. Хонинговальная головка. / Брискин В. Д., Фрагин И. Е., Попова Н. И. - Опубликовано 07.08.1985 г. — Бюллетень № 29.
39. Авторское свидетельство СССР № SU 1611706. Способ хонингования гильз цилиндров внутреннего сгорания. / Павлиский В. М., Трипольский Л. Р., Павлюк И. Н., Сорина У. В., Мурый А. М. - Опубликовано 07.12.1990 г. - Бюллетень № 45.
40. Richter Alan. Honing in on perfection. // *Cutt. Tool Eng.*, 2006. - N 8. - P. 204-205.
41. Душко О. В., Шумячер В. М., Башкирцева И. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на коэффициент трения абразива по металлу. // *Технология машиностроения*. - М.: Машиностроение, 2005. - № 12.-С. 39-42.
42. Янке. Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции, «Наука», Москва, 1968.

43. Емельяненко А. А., Секачев С. А. Влияние режимов суперфиниширования на износ и продуктивность абразивных брусков без связки. // Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2003. - № 2. - С. 26 - 29.
44. Полянчиков Ю. Н. Оптимизация процесса хонингования по критерию точности. // Технология машиностроения. — М.: Машиностроение, 2001. — №5.- С. 10-12.
45. Адлер Ю. П., Марков Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1997. - 270 с.
46. Патент РФ № RU 1396431. Способ хонингования наружных поверхностей./ Алимов С. П., Гринглаз Л. А., Кулаков Г. А., Клейнер В. Е. - Опубликовано 20.02.2002 г., Бюллетень № 5.
47. Авторское свидетельство СССР № SU 1781012. Способ хонингования. / Романчук В. А., Каяшев А. И. - Опубликовано 15.12.1992 г. – Бюллетень
48. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів.
49. Основы охорони праці: підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. – Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.
50. Основы охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халі мовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
51. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основы охорони праці: підручник для студентів вищих навч. закладів / За ред. М.П. Гандзюка – К.: Каравела, 2004. – 408 с.
52. Голінько В.І. Г 60 Основы охорони праці: підручник / В.І. Голінько; МОН України; Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.