

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ВОРОШИЛОВ ГЛІБ МИКОЛАЙОВИЧ**

**УДК 621.822**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Підвищення довговічності підшипникових вузлів  
мобільних сільськогосподарських машин**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ Г.В. Ворошилов

**Керівник роботи**

Міненко С.В.

кандидат технічних наук

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Ворошилов Гліб Миколайович. Підвищення довговічності підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що якість чистової обробки поверхонь тертя підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин суттєво впливають їх зносостійкість та довговічність.

Проведені експериментальні дослідження та математичне моделювання дозволило встановити залежності параметрів мікрогеометрії поверхневого шару після вигладжування від режимів  $P$ ,  $s$ ,  $n$  для вигладжувальної операції з використанням інструменту з синтетичного алмазу, що дозволить забезпечити необхідність якість поверхні для підвищення довговічності підшипникових вузлів сільськогосподарських машин

Запропонована оригінальна конструкція державки вигладжувача, яка дозволяє згладжувати вібрації в зоні вигладжування. Використання державки покращило якість поверхневого шару по  $R_a$  на 12...18%.

*Ключові слова: поверхня тертя, алмазне вигладжування, підшипникові вузли, мікрогеометрія, режими.*

## ANNOTATION

**Voroshilov Glib Mikolayovich. Increasing the durability of bearing units of mobile agricultural machines. – *The quality of the robot as a manuscript.***

The quality of the robot for the purpose of the master's degree for specialties 208 - Agroengineering. – Polisky National University, Zhytomyr, 2020.

As a result of the analysis, it was established that the cleanliness of the clean surface of the rubbing of the bearing universities of the mobile agricultural machines was established.

The conducted experimental researches and mathematical modeling allowed to establish dependences of parameters of microgeometry of a surface layer after smoothing on modes  $P$ ,  $s$ ,  $n$  for smoothing operation with use of the tool from synthetic diamond that will allow to provide necessity of quality of a surface for increase of durability of bearing units of agricultural machines.

The original design of the smoother holder which allows to smooth out vibrations in a smoothing zone is offered. The use of the holder improved the quality of the surface layer on Ra by 12... 18%.

*Key words: rubbing surface, diamond viglajuvannya, bearing universities, microgeometry, modes.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ.....	7
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	15
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ НА ЗМІЦНЮВАЛЬНО-ВИГЛАДЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ.....	21
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

## ВСТУП

Надійність елементів трибосистем, в більшості випадків, визначають показники надійності сільськогосподарської техніки. До основних показників які визначають надійність елементів трибо системи слід віднести зносостійкість та довговічність. Найбільш навантаженими трибосистемами в сільськогосподарських машинах можна вважати підшипникові вузли, оскільки саме вони найчастіше виходять з ладу. Довговічність підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин залежить від багатьох факторів (матеріал, термообробка, швидкість, динамічні навантаження та ін.). Одним із значимих факторів, який визначає довговічність підшипникового вузла є початкова якість поверхні [1-4], саме тому пошук способів покращення початкової якості поверхні тертя підшипникового вузла є беззаперечно актуальною задачею.

**Мета і задачі дослідження.** Мета досліджень – підвищити надійність підшипникових вузлів мобільної сільськогосподарської техніки за рахунок покращення початкової якості поверхонь тертя.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Проаналізувати вплив параметрів обробки на якість поверхонь тертя підшипникових вузлів;
- Розробити експериментальна установка та методика проведення досліджень;
- Провести експериментальні дослідження та визначити оптимальні режими алмазного виглажування для підвищення довговічності підшипникових вузлів.

**Об'єкт дослідження:** процес формування триботехнічних характеристик поверхонь тертя підшипникових вузлів.

**Предмет дослідження:** взаємозв'язок параметрів алмазного виглажування з якістю поверхонь тертя підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин.

**Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням загальнонаукових методів пізнання, інженерії поверхні, трибології, фізики твердого тіла, прикладної фізики та механіки. Обробку експериментальних даних проводили з використанням методів математичної статистики.

**Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Ворошилов Г. М.** Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 158-160.

2. **Ворошилов Г. М.** Експериментальна установка та методика визначення оптимальних режимів алмазного вигладжування. Аналіз та значення зміцнювально-вигладжувальних технологій в забезпеченні параметрів якості поверхонь деталей. Збірник матеріалів і Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції *«Теорія і практика сучасної науки очима молоді»* 26 березня 2020 року (проведено он-лайн 30 квітня 2020 року) м. Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка. С. 87-88.

3. Куликівський В. Л., Мельник В. Л. Голощук В. О., **Ворошилов Г. М.**, Гончарук В. А., Мандра В. В., Гордієнко В. С. Зносостійкі покриття на основі кобальту. Матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції *«Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту»*. 18-19 листопада 2020 року. Кропивницький : ЦНТУ. С.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи можуть бути впровадженні при виготовленні та ремонті складових частин підшипникових вузлів.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки комп'ютерного тексту, містить 5 таблиць і 10 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ

Поверхневий шар деталі формується під впливом технологічних чинників (склад, структура та механічні властивості оброблюваного матеріалу; геометрія, мікрогеометрія і зношення різальної частини інструменту; режими різання; жорсткість системи ВІД; кількість, якість і спосіб підведення ЗОР) та зовнішнього середовища. У свою чергу технологічні чинники, їх рівень і величина дії залежать від методу, режиму оброблення і матеріалу деталі [1].

Якість обробленої поверхні характеризується величиною макро- і мікронерівностей, а також фізико-механічним станом поверхневого шару [1]. Макронерівності є одиничними, які не повторюються регулярно, відхиленнями поверхні від геометричної форми.

Фізико-механічний стан обробленої поверхні характеризується: твердістю; ступенем наклепу, його глибиною; структурою поверхневого шару а також величиною, знаком і глибиною розповсюдження залишкових напружень в поверхневому шарі. Всі ці характеристики залежать від величини пластичних деформацій, фазових і структурних перетворень, зумовлених тепловими явищами при різанні металу. Ступінь наклепу та глибина шару, що наклепується, знак і величина залишкового напруження в поверхневому шарі залежать від оброблюваного матеріалу, методу оброблення і режимів різання [1].

Геометричні відхилення поверхонь (рис. 1.1.) розрізняють залежно від відношення довжини кроку  $T$  до висоти нерівності  $H$ : при  $T/H > 1000$  мають місце макроскопічні відхилення від правильної геометричної форми (конусність, овальність, вгнутість тощо), при  $T/H = 50 - 1000$  – хвилястість поверхні;  $T/H < 50$  – шорсткість поверхні. Субшорсткість – це субмікронерівності висотою приблизно  $10^{-3} - 10^{-2}$  мкм, що накладаються на шорсткість поверхні [2].

Величина та напрямок мікронерівностей впливають на зношення деталей (первинне зношення, яке відбувається унаслідок стирання нерівностей, складає 65...75% висоти нерівностей); стійкість проти корозії; міцність (в поверхневих нерівностях, як і в тріщинах, відбувається концентрація напруження); коефіцієнт тертя, залежний від взаємного розташування рисок, на поверхнях деталей (риски, тобто сліди від різального інструменту, мають бути мінімальними) [2-8].

На шорсткість поверхні впливають наступні основні чинники [9-11]:

1) склад, структура та механічні властивості оброблюваного матеріалу; 2) матеріал, геометрія, мікрогеометрія і зношення різальної частини інструменту; 3) режими різання; 4) жорсткість системи ВІД; 5) кількість, якість і спосіб підведення змащувально-охолоджувальних рідин.

Із зміною властивостей оброблюваного матеріалу змінюється висота

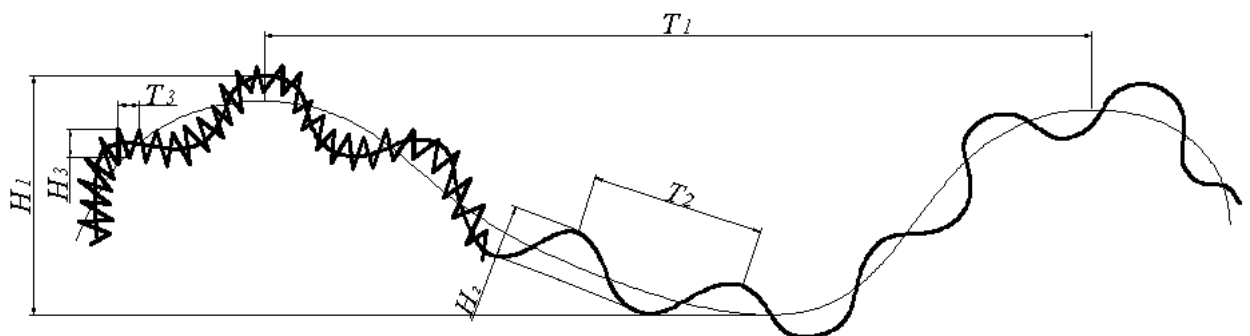


Рис. 1.1. Геометричні відхилення поверхні [1]

шорсткості, а також характер впливу інших чинників на чистоту поверхні. Після оброблення низьковуглецевої сталі шорсткість є більшою, ніж середньо- і високовуглецевої. Пояснюється це великим вмістом фериту в низьковуглецевій сталі, який підвищує схильність до наростоутворення.

На шорсткість поверхні впливає також матеріал інструменту. Наприклад, інструменти з вуглецевої і легованої сталі дозволяють отримати за незначних швидкостей оброблення чистішу поверхню, ніж інструменти з швидкорізальної сталі. Із підвищенням швидкості різання до 15-30 м/хв шорсткість збільшується внаслідок приварювання дрібних часток стружки до різального леза, оскільки оброблюваний матеріал (сталь конструкційна) та матеріал інструменту (сталь



інструментальна) мають велику хімічну спорідненість. На твердосплавні інструменти стружка налипає менше, ніж на швидкорізальні, тому шорсткість поверхні є меншою. Крім того, твердосплавні інструменти повільніше зношуються, що також сприяє отриманню чистішої поверхні [9].

Геометрія різального ребра інструменту також впливає на шорсткість поверхні. Характер впливу цього чинника залежить від кінематики відносного руху різального інструменту та заготовки. Наприклад, за один оберт заготовки вершина різця переміщується уздовж створеної циліндричної поверхні на крок,

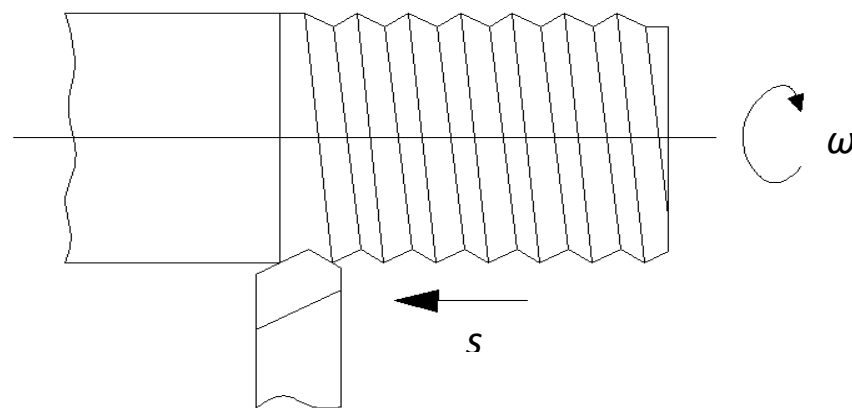


Рис. 1.2. Схема утворення залишкового гребінця в процесі оброблення

що дорівнює подачі, з одного положення в інше. При цьому на обробленій поверхні залишиться частина матеріалу, не знята різцем і утворить при цьому залишковий гребінець (рис. 1.2.) [11].

Величина та форма гребінця залежать від подачі на оберт і форми різальної частини різця, що характеризується кутами  $\varphi$  і  $\varphi_1$ , та радіусом вершини. За наявності в леза радіуса округлення шорсткість  $R_z$  є меншою. По мірі затуплення леза на різальних ребрах з'являються підщерблення, що також впливає на шорсткість. За даними досліджень [2, 6], при точінні шорсткість від затуплення зростає на 50 - 60%, при фрезеруванні циліндричними фрезами - на 100... 115%, торцевими фрезами – на 35 - 45%, свердлами на 30 - 40% та розгортванні – на 20 - 30%. На шорсткість поверхні впливає радіус  $r$  закруглення різальних ребер і величина кутів в плані. При цьому кожному

значенню подачі відповідає деяке значення радіуса  $r$ , при якому висота шорсткості буде найменшою. Наприклад, подачі  $s = 0,10$  мм/об для точіння сталі відповідає значення  $r \approx 1,0$ мм.

В процесі шліфування на шорсткість поверхні впливають геометричні характеристики абразивних зерен, відстань між ними. Під час шліфування кожне абразивне зерно прорізає в матеріалі слід. Після правки шліфувального круга алмазним інструментом на його поверхні з'являються гвинтові нерівності, які також переносяться на оброблювану поверхню. Залежно від методу оброблення й типу різального інструменту нерівності на поверхні деталі мають відповідний напрям [12-16].

Вплив швидкості різання на висоту шорсткості в процесі оброблення різних матеріалів показано на рис. 1.3, а. Крива 1, майже паралельна осі абсцис, характерна для крихких матеріалів, чистота поверхні яких мало залежить від швидкості різання. Крива 4 показує збільшення висоти шорсткості із збільшенням швидкості різання при обробленні легкоплавких матеріалів. Це пояснюється частковим оплавленням матеріалу деталі під час високої температури та появою задирів. Крива 2 є характерною для випадку оброблення жароміцної та нержавіючої сталі, коли стійкий нарост утворюється лише за невисоких швидкостей різання. Крива 3 є характерною для випадку оброблення вуглецевих і більшості легованих сталей.

Змашувально-охолоджувальні рідини зменшують висоту шорсткості, але їх вплив є помітним лише в зоні швидкостей різання до 60-70 м/хв. [17].

Із збільшенням подачі шорсткість поверхні збільшується (рис 1.3, б). Однак, зменшення подачі є доцільним до деякого граничного значення  $S_{гран}$ , нижче якого чистота поверхні помітно не покращується, а інколи навіть погіршується. Пояснюється це тим, що при малій подачі пластичні деформації і нерівномірність подачі суттєво впливають на збільшення шорсткості поверхні [2].

В процесі оброблення деталей абразивними інструментами шорсткість зменшується із зменшенням розмірів зерна, підвищенням твердості

інструменту, підвищенням швидкості обертання інструменту та деталі, зменшенням поздовжньої та поперечної подач, збільшенням числа проходів без поперечної подачі. Але необхідно враховувати, що кожному класу чистоти відповідає деяке оптимальне значення зернистості, за якого продуктивність є найбільшою. Використання способу подачі змащувально-охолоджуючої рідини через пори шліфувального круга зменшує висоту шорсткості на 20—30%.

Пластичні та пружні деформації матеріалу під час оброблення різанням впливають на поверхневий шар деталі. Поверхневий шар деталі з пластичних

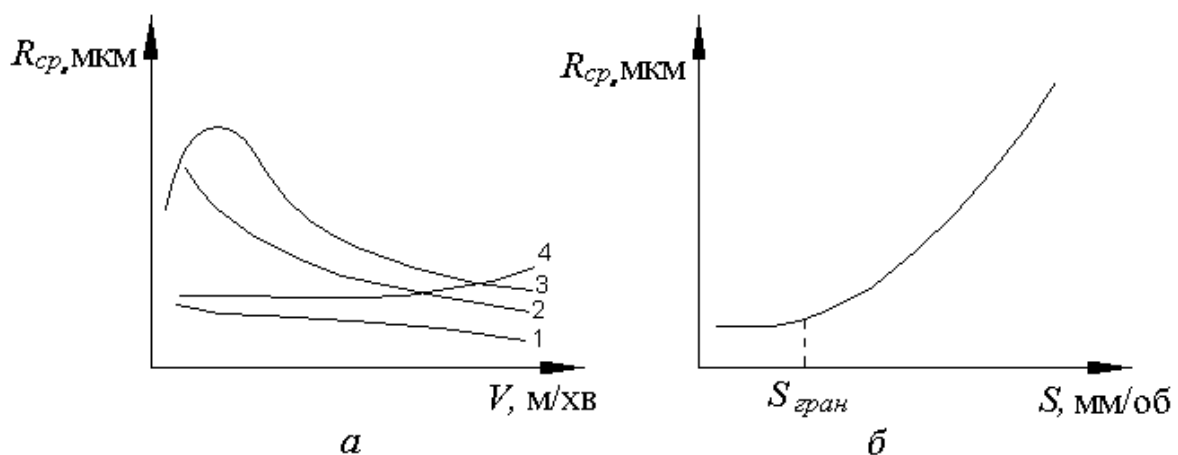


Рис. 1.3. Залежність висоти шорсткості від:  
а – швидкості різання; б – подачі

матеріалів деформується, в результаті виникають нерівності обробленої поверхні. В процесі оброблення крихких металів має місце виривання окремих часток металу. Пластичні деформації під час оброблення різанням лезовим інструментом залежать від швидкості різання. У діапазоні швидкостей 20-40 м/хв під дією зусиль, які притискають шари металу до передньої поверхні різця і високої температури шари металу приварюються до передньої та частково, задньої поверхні різця, утворюючи нарост, який змінює форму різального ребра леза і різко збільшує шорсткість. Із зростанням швидкості різання кількість теплоти, що виділяється в процесі утворення стружки, збільшується, нарост, нагріваючись швидше за останню частину зони деформації, руйнується і шорсткість зменшується [14].

Під час знімання стружки різцем частина металу заготовки, розміщена під ним, піднімається його заокругленою частиною, піддається пружній і пластичній деформації. Після проходження різця незрізаний шар металу частково і нерівномірно пружно відновлюється і викликає тертя по задній поверхні, тим самим збільшується висота нерівності профілю поверхні. При високих швидкостях різання глибина пластично деформованого шару зменшується.

В перехресній правці шліфувальних кругів алмазними інструментами отримані поверхні відповідають 11-12-му класам чистоти при одному - двох проходах без поперечної подачі.

Вібрації, що виникають в технологічній системі та створюють відносні коливальні рухи заготовки і різального інструменту, також є причиною виникнення шорсткості. При цьому, чим вище амплітуда коливань, тим більшою є шорсткість.

Головними причинами виникнення вібрацій у процесі механічного оброблення є [15]:

- 1) коливання, що виникають внаслідок дисбалансу частин верстата й деталі, що обертається;
- 2) коливання внаслідок переривчастого характеру процесу різання (наприклад, під час роботі багатолезовим інструментом);
- 3) коливання, що виникають внаслідок нерівномірності передач у верстатах;
- 4) коливання, що передаються зовні від інших працюючих машин.

У вібраціях верстатів беруть участь як вимушені коливання, так і власні коливання (автоколивання). Основну роль у виникненні вібрацій відіграє автоколивальний процес. Як впливає з формулювання автоколивального процесу, останній може описуватися лише системами нелінійних диференційних рівнянь. Оскільки розв'язання таких систем рівнянь пов'язано з великими труднощами то приймаються деякі припущення, які дають змогу розглядати систему як лінійну з меншою кількістю ступенів вільності.

Вібрації, а разом з ними й збільшення нерівностей поверхні, можуть виникати також внаслідок так званих «релаксаційних» автоколивань, які виникають за достатньо малих швидкостей переміщень системи (наприклад, під час розгортання отворів розгортками, коли отвір внаслідок цих коливань стає ограним). Іншим прикладом релаксаційних автоколивань можуть бути також заїдання у механізмах подачі верстатів. Під час дії цих механізмів рухомі частини верстата (наприклад, стіл чи супорт) протягом деякого часу затримуються силою тертя і деякий час не переміщуються, незважаючи на те, що пружні деформації, а разом з ними і зусилля у механізмі приводу подачі постійно зростають. У момент, коли ці зусилля стають більшими за сили тертя спокою, рухома частина верстата стрибком переміщається на деяку відстань вперед, і нагромаджена енергія пружних переміщень ривком звільняється. Через деякий відрізок часу рухомі частини верстата зупиняються і весь цикл знову повторюється. Оскільки частота власних коливань будь-якої коливальної системи пропорційна квадратному кореню жорсткості, то із збільшенням жорсткості системи збільшується частота власних коливань і зменшується амплітуда цих коливань. Отже, збільшення жорсткості системи — один з найважливіших засобів у боротьбі з вібраціями [17].

Іншим важливим засобом зменшення вібрацій є усунення будь-яких зазорів у частинах системи ВІД.

Таким чином, поява вібрацій верстатів спостерігається за наявності малих головних кутів в плані різця, а також утворення тонкої та широкої стружки й високої вязкості оброблюваного матеріалу.

Зменшення вібрацій відбувається шляхом застосування демпфувальних пристроїв та різного роду компенсаторів вібрацій. Всі ці компенсатори, що зв'язуються у той чи інший спосіб з інструментом або оброблюваною деталлю, можуть бути динамічної або ударної дії, а також фрикційними. У фрикційних компенсаторах енергія коливань під час вібрацій гаситься силою тертя.

## **Висновки по розділу 1**

В першому розділі магістерської роботи встановлено, що параметри обробки суттєво впливають на якість поверхонь підшипникових вузлів і в подальшому визначають їх зносостійкість та довговічність.

## РОЗДІЛ 2

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження параметрів якості оброблюваних поверхонь та їх зв'язок з режимами оброблення, матеріалом інструменту проводили на токарному станку 1И611П (рис. 2.1) відповідно до загальноприйнятих методик [18-20].

Для проведення експериментальних досліджень алмазного вигладжування була виготовлена пружна державка для вигладжувальних наконечників із синтетичних алмазів типу АКТМ (рис. 2.2, 2.3).

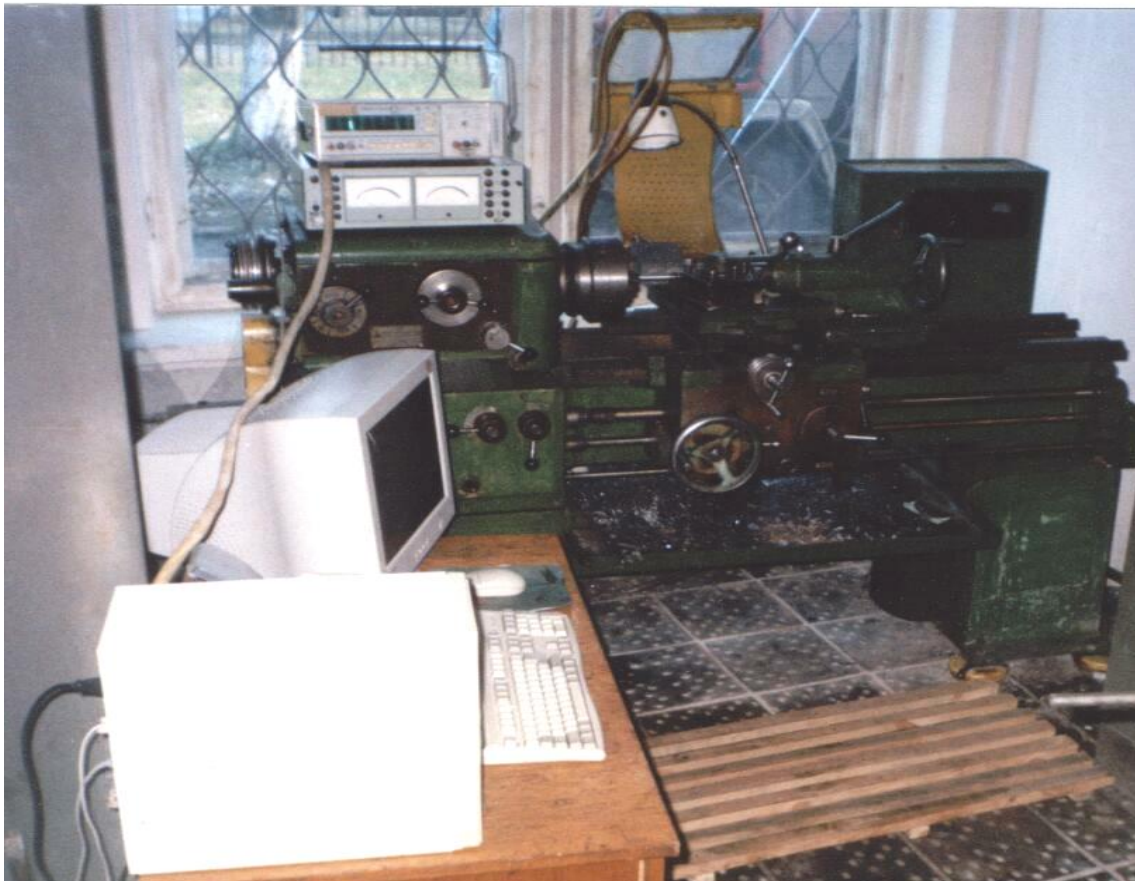


Рис. 2.1. Автоматизований дослідний комплекс на основі токарно-гвинторізного верстата моделі 1И611П

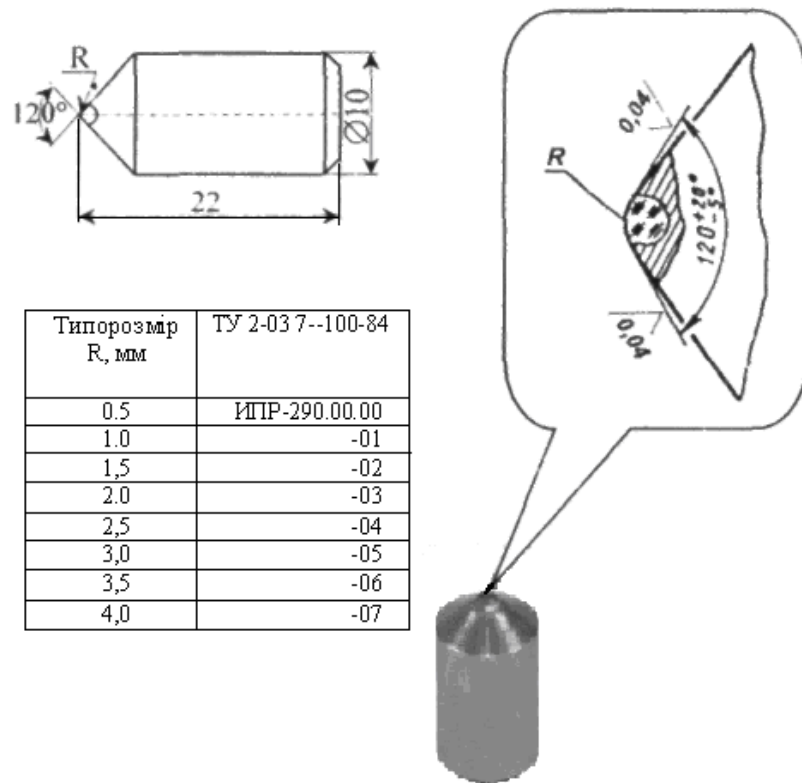


Рис. 2.2. Зовнішній вигляд та типорозміри наконечників вигладжувачів з синтетичних алмазів типу АКТМ

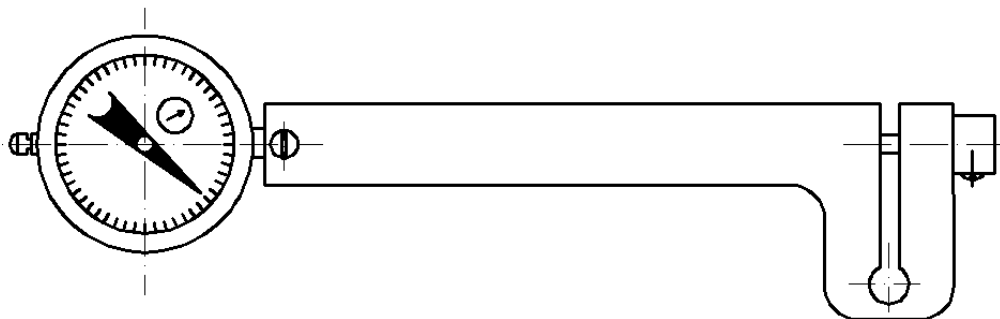


Рис. 2.3. Зовнішній вигляд пружної державки для вигладжування

Для вимірювання сили вигладжування до неї прикріпили індикатор годинникового типу. Конструкцію державки було таровано за схемою, показаною на рис. 4.



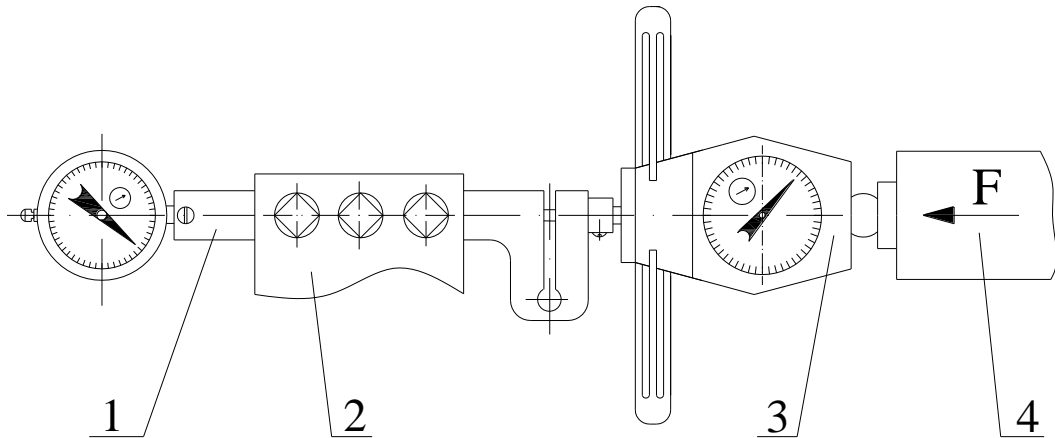


Рис. 2.4 Схема тарування державки вигладжувача: 1 – державка з індикатором годинникового типу; 2 – різцетримач токарного верстату; 3 – динамометр стискування зразковий механічний ДОСМ-3-0,05; 4 – задня бабка токарного верстату

Послідовність тарування полягає в наступному: на токарному верстаті державку закріпили в різцетримачі. Між державкою (вигладжуючим наконечником) та задньою бабкою розмістили зразковий динамометр. Задня бабка використовувалася в якості пристосування для навантаження динамометра, через який передавалося зусилля на державку. Таким чином, спостерігаючи за відліком індикатора на державці та індикатора на динамометрі було встановлено, які покази відповідають силі навантаження 50Н, 100Н, 150Н, 200Н, 250Н, 300Н, 350Н, 400Н.

З метою розширення можливостей вигладжування та покращення параметрів оброблення було розроблено основний та допоміжний інструмент.

Пристосування містить засіб для розміщення робочих елементів (вигладжувачів) виконаний у вигляді опозитно розміщених Г-подібних стійок, які оснащені індикаторами сили притискання та притискач робочого елемента, який виконано у формі ходового гвинта (рис. 2.5)

Для вигладжування характерна копіювати попередні нерівності спричиненні попередньою обробкою поверхні, наприклад «гвинтову лінію» отриману після токарного оброблення (рис. 2.6. а), що негативно впливає на її експлуатаційні властивості.

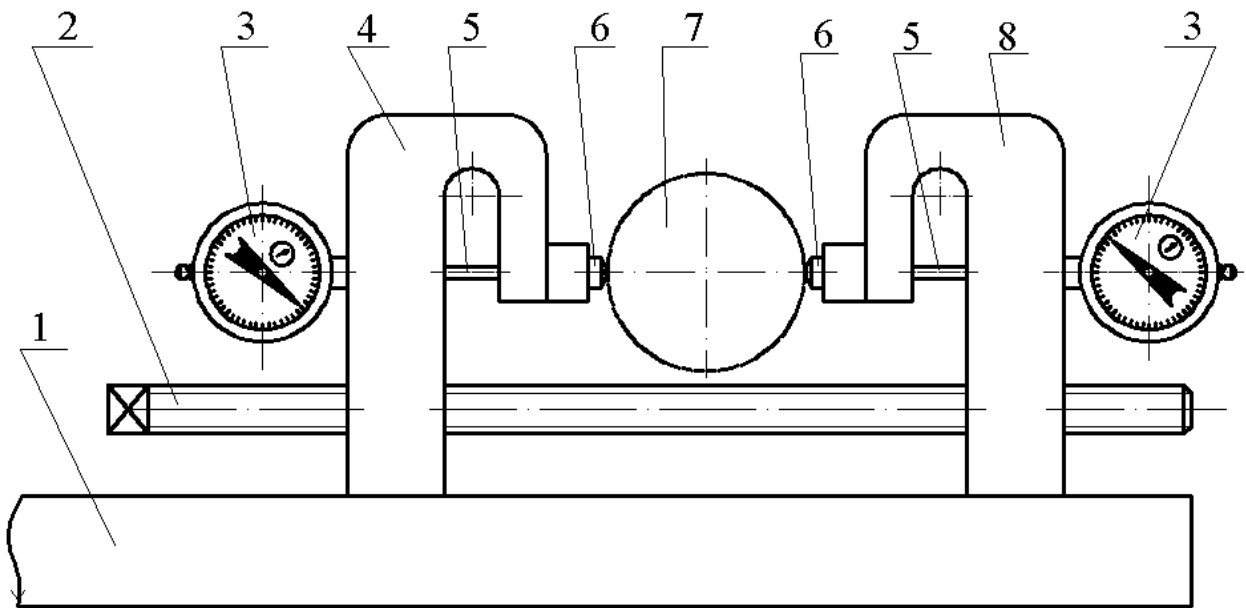


Рис.2.5. Пристосування для вигладжування поверхонь обертання: 1 – основа, 2 – гвинт ходовий, 3 – індикатор годинникового типу, 4 – стійка ліва, 5 – шток індикатора, 6 – вигладжувач, 7 – оброблювана заготовка, 8 – стійка права.

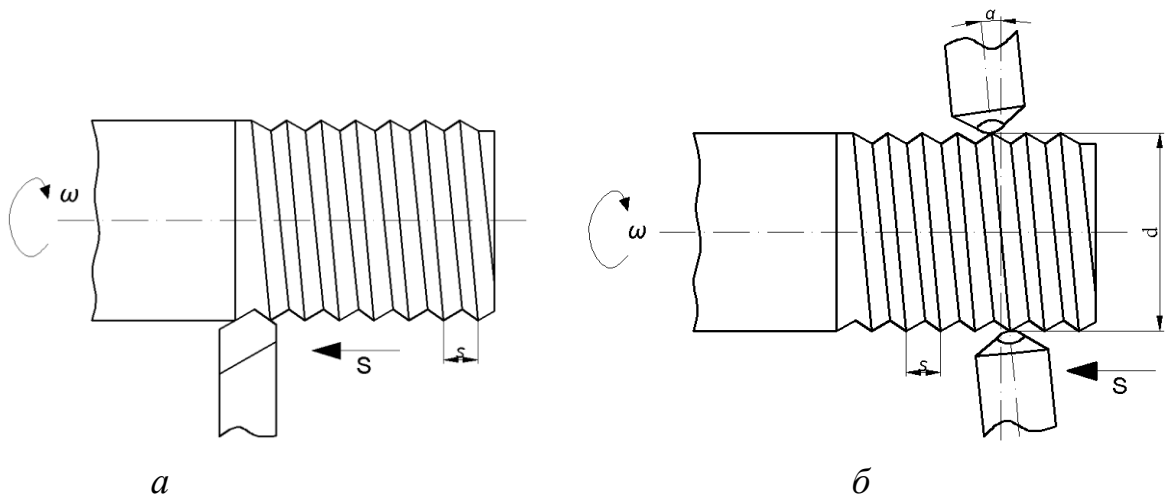


Рис. 2.6. Схема утворення «гвинтової лінії» (а) та схема повороту вигладжувальних елементів (б)

Для усунення необхідно, щоб вирівнювання відбувалося по вершинах мікронерівностей, а подача вирівнювання,  $S_a$  дорівнювала подачі на попередньої обробки,  $S_i$ :  $S_a = S_i$ .

Для здійснення деформування вершин мікронерівностей від попереднього оброблення пристосування має багато можливостей (рис. 2.6. б).

Кут  $\alpha$  визначено за формулою:

$$\alpha = \arctg \frac{s}{2 \cdot d},$$

де  $s$  – крок подачі на попередній операції оброблення;

$d$  – діаметр заготовки.

Використання ЗОР в обробленні вигладжуванням знижує тертя в зоні контакту деталі та вигладжувача, сприяє зменшенню тепловиділення, забезпечує інтенсивне відведення теплоти від нагрітих ділянок деталі та робочої поверхні вигладжувача, тим самим підвищує продуктивність процесу.

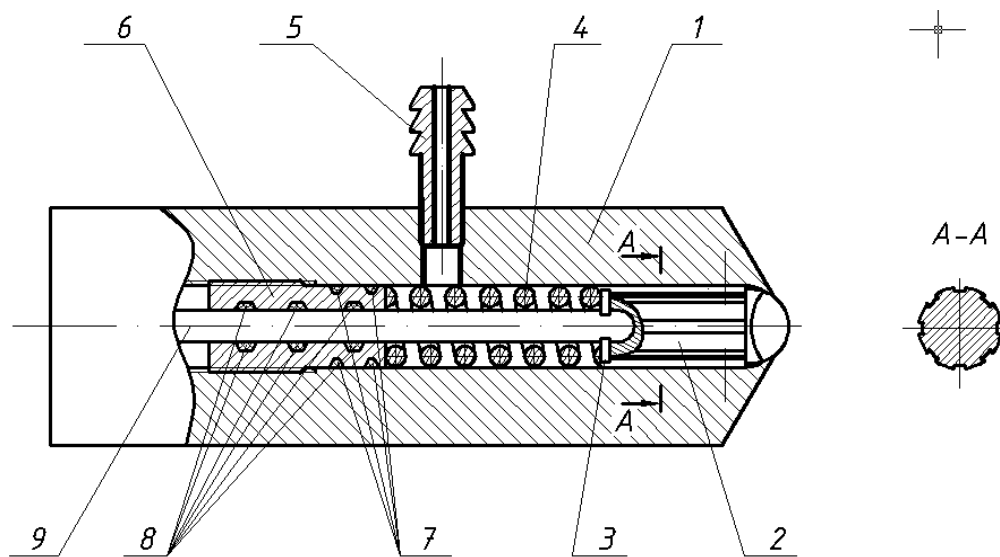


Рис. 2.7. Пристосування для вигладжування.

Експериментальні дослідження параметрів мікротопографії робочих поверхонь роликотідшипників проводились в метрологічній лабораторії на автоматизованому вимірювальному комплексі.

Послідовність проведення експериментальних досліджень на автоматизованому комплексі включає проведення сканування досліджуваної поверхні контактним або безконтактним способом (лазерним променем), автоматизоване оброблення результатів, отримання і друк необхідних зображень, ідентифікаційної таблиці тощо.

Для зміцнювально-вигладжувального оброблення синтетичними алмазами був спланований та поставлений експеримент, який враховує результати попередніх експериментів [5].

## **Висновки по розділу 2**

В другому розділі магістерської роботи розроблено установку та методику для проведення досліджень по визначенню оптимальних параметрів алмазного вигладжування.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ НА ЗМІЦНЮВАЛЬНО-ВИГЛАДЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Для реалізації багатофакторної регресійної моделі  $R_a, S_m, H_\mu = f(P_s, s, n, R_{av}, S_{mv})$  процесу вигладжування, яка відображає кількісні зв'язки між силою вигладжування ( $P_s$ ), подачею ( $s$ ), частотою обертання шпинделя ( $n$ ), вихідними параметрами якості поверхневого шару  $R_{av}$  (середнє арифметичне відхилення профілю, початкове),  $S_{mv}$  (середній крок нерівностей профілю, початковий) і параметрами якості поверхневого шару ( $R_a, S_m, H_\mu$ ), був спланований і поставлений практичний експеримент. Частота обертання шпинделя була обрана в якості чинника за наступними міркуваннями: зміна лінійної швидкості в межах від 150 до 300 м/хв, що здійснюється за постійної частоти обертання шпинделя зміною діаметру не робить впливу на якість вигладженої поверхні [4]; збільшення частоти обертання шпинделя вище 630 хв<sup>-1</sup> веде до різкого збільшення  $R_a$ , що обумовлюється биттям шпинделя верстата і биттям оброблюваної деталі [3, 4]. Відомо також, що під час вигладжування спостерігаються вимушені коливання і автоколивання [14]. Вимушені коливання викликаються такими причинами, як биття шпинделя верстата, биття оброблюваної деталі тощо, автоколивання в процесі вигладжування зумовлені явищами, притаманними самому процесу вигладжування. Як наслідок на оброблюваній поверхні з'являється поздовжня і поперечна хвилястість в результаті коливання в ТС, що також враховувалося при виборі рівнів факторів.

У загальному випадку модель може бути представлена у вигляді:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

де  $y$  - функція відгуку;

$x_1 x_2 \dots x_n$  - фактори, від яких залежить відгук і якими можна варіювати під час постановки експерименту.

Як функції відгуку прийняті значення  $R_a$ ,  $S_m$  і  $H_\mu$ .

Найбільш поширеним описом функції відгуку є подання її поліномом. На першому етапі висувається гіпотеза про лінійність моделі, тобто

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i, \quad (3.2)$$

де  $k$  - число контрольованих факторів.

Реалізується експеримент, необхідний для визначення її параметрів.

Перевіряється адекватність моделі. Якщо лінійна модель неадекватна, то висувається гіпотеза про пріоритетний вплив взаємодіючих факторів.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad (3.3)$$

Обчислюються параметри моделі та проводиться перевірка її адекватності. Якщо модель типу (4.3) неадекватна, то виконані раніше досліди доповнюють новою серією, що дозволяє обчислювати коефіцієнти  $b_{ij}$  квадратичної моделі (полінома другого ступеня):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k b_{ij} \cdot x_i^2 \quad (3.4)$$

З метою полегшення оброблення результатів експерименту фактори нормалізують. Для визначення параметрів лінійної моделі достатньо в досліді кожен фактор фіксувати на одному з двох рівнів: верхньому або нижньому. Верхній рівень нормалізованого фактору позначають (+), а нижній (-).

На першому етапі дослідження була реалізована напіврепліка  $2^{5-1}$ , методику реалізації викладено в [94-100]. Інтервали варіювання приймалися, виходячи з реальних меж коливання значень факторів, визначених в результаті попередніх пошукових експериментів.

Фактори, рівні та інтервали варіювання факторів наведено в таблиці 3.1. Матриця плану експерименту и результати вимірювань наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.1 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Рівень фактору	Фактори				
	Сила вигладж ування $P_6$ , Н	Подача $S$ , мм/об	Частота обертання шпинделя $n$ , хв <sup>-1</sup>	Середнє арифметичне відхилення профілю, вихідне $R_{av}$ , мкм	Середній крок нерівностей профілю, вихідний $S_m$ , мкм
Кодоване	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
Верхній (+)	300	0,12	630	1,0	42
Основний (0)	200	0,084	500	0,8	35,5
Нижній (-)	100	0,04	400	0,6	29

Коефіцієнти рівняння регресії (4.3) визначено за формулами ( $i, l$  - номери факторів,  $j$  - номер рядка в матриці планування):

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad (3.5)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot y_j}{N}; \quad (3.6)$$

$$b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot x_{lj} \cdot y_j}{N}. \quad (3.7)$$

Визначення залежності середнього арифметичного відхилення профілю від режимів оброблення і параметрів початкової шорсткості поверхні

В результаті розрахунків були отримані наступні значення коефіцієнтів:

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
0,2950	-0,0075	0,0888	01081	0,0788	-0,0344
$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{15}$		
0,0200	-0,0119	0,0338	0,0294		
$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$			
0,0206	-0,0075	-0,0156			
$b_{34}$	$b_{35}$				
0,0819	0,0513				
$b_{45}$					
0,0194					

Для перевірки адекватності рівняння регресії та визначення дисперсії коефіцієнтів необхідно визначити дисперсію  $s^2\{y\}$  відтворюваності експерименту.

Дисперсію  $s^2\{y\}$  визначали за шістьма паралельним дослідом в центрі плану, тобто за результатами дослідів, виконаних для знаходження факторів на основних рівнях (таблиця 3.2),

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y - \langle y \rangle)^2}{n_0 - 1}, \quad (3.8)$$

де  $n_0$  - число паралельних дослідів в центрі плану;

$y$  - значення функції відгуку в  $i$  - досліді;

$\langle y \rangle$  - середнє арифметичне значення функції відгуку в  $n_0$  дослідях;

$i$  - номер паралельного дослідів в центрі плану

$$s^2(y) = 0,00015.$$

Середня квадратична помилка у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії для  $u$  виявилася такою:

$$s\{b_i\} = +\sqrt{\frac{s^2\{y\}}{N}} = +\sqrt{\frac{0,00015}{16}} = 0,00304.$$

Довірчий інтервал для коефіцієнтів рівняння регресії  $\Delta b_i = \pm 2,57 \cdot 0,00304 = \pm 0,0078$ .



У зв'язку з тим, що коефіцієнти  $b_1, b_{24}$ , за абсолютною величиною менше довірчого інтервалу, їх визначаємо статистично незначними й виключаємо з рівняння регресії.

Різниця  $b_0 - \langle y \rangle = -0,008$  за абсолютною величиною менше помилки досліду  $s\{y\} = 0,012$ , отже, коефіцієнти при квадратичних членах значно не відрізняються від нуля, тому досліджувана залежність з достатньою точністю може бути апроксимувати поліномом першого ступеня і не потрібно переходити до квадратичної моделі.

Для перевірки адекватності рівняння регресії обчислено дисперсію  $S_{ad}^2$  адекватності:  $S_{ad}^2 = 0,00018$ .

Адекватність рівняння регресії перевіряємо по  $F$ -критерію. Знаходимо розрахункове значення  $F$ -критерію:

$$F_p = \frac{S_{aa}^2}{S_y^2} = \frac{0,00018}{0,00015} = 1,2$$

Табличне значення  $F_m$ -критерію при 5%-вому рівні значущості дорівнює 4,9, так як  $F_p < F_m$ , то модель є адекватною.

Перехід від кодіваних ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ ) до натуральних ( $P, s, n, R_{av}, S_{me}$ ) значень чинників здійснюється відповідно до умов експерименту (див. таблицю 4.2) за формулою:

$$x_i = \frac{x - x_0}{\Delta x} \quad (3.9)$$

де  $x_i$  - натуральне значення;

$x_0$  - натуральне значення чинників на основних рівнях,

$\Delta x$  - значення інтервалів варіювання.

Таблица 3.2. План эксперименту (сталь ШХ15)

№ досл.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_1x_5$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_2x_5$	$x_3x_4$	$x_3x_5$	$x_4x_5$	$Ra$	$Sm$	$H_u$
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,045	11,9	2990
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,125	3,6	4560
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,125	5,7	3040
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	0,165	6,4	3640
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,115	4,4	2950
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	.	+	-	0,095	5,6	4300
7	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,145	11,4	2960
8	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,175	11,4	3500
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,185	8,1	3030
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,120	4,6	4490
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,075	2,7	3170
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,155	13,2	3740
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,190	5,4	3000
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,175	6,9	4300
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,140	27,8	3050
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,15	9,3	3640

Таблиця 3.3 – Допоміжна таблиця для розрахунку дисперсії  $s^2\{y\}$ 

Номер досліджу	$y(Ra)$	$\langle y \rangle$	$y - \langle y \rangle$	$(y - \langle y \rangle)^2$
1	0,315	0,303	0,012	0,000144
2	0,290		-0,013	0,000169
3	0,285		-0,018	0,000324
4	0,305		0,002	0,000004
5	0,310		0,007	0,000049
6	0,310		0,007	0,000049

Рівняння (3.3) з урахуванням відношення (4.9) можна представити наступним виразом:

$$\begin{aligned}
 Ra = & 2,761 \cdot 0,0225 \cdot P_{\epsilon} + 7,01 \cdot S - 0,0184 \cdot n - 1,255 \cdot R_{an} - 0,0415 \cdot S_{mn} - \\
 & 0,000009 \cdot P \cdot n + \\
 & + 0,00676 \cdot P \cdot R_{an} + 0,00018 \cdot P \cdot S_{mn} + 0,0277 \cdot S \cdot n - 0,178 \cdot S \cdot S_{mn} + 0,00744 \cdot R_{an} \cdot n + \\
 & + 0,000143 \cdot n \cdot S_{mn} + 0,01492 \cdot R_{an} \cdot S_{mn} + 0,059 \cdot P \cdot S.
 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Визначення залежності середнього кроку нерівностей профілю від режимів оброблення і параметрів початкової шорсткості поверхні.

В результаті розрахунків були отримані наступні значення коефіцієнтів:

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
8,6440	-1,0260	2,3262	1,6166	1,1079	-1,4809
$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{15}$		
0,1036	-0,9539	-0,2281	0,3266		
$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$			
2,3543	1,1574	-2,0442			
$b_{34}$	$b_{35}$				
0,9855	-0,8764				
$b_{45}$					
-2,7533					

Дисперсію  $s^2(y)$  визначено за шістьма паралельними дослідями в центрі плану, тобто за результатами дослідів, виконаних під час знаходження факторів на основних рівнях (таблиця 4.2),  $s^2(y) = 0,406$ .

Середня квадратична помилка у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії для  $y$  дорівнює:

$$s\{b_i\} = +\sqrt{\frac{0,406}{16}} = 0,1592.$$

Таблиця 3.4 – Допоміжна таблиця для розрахунку дисперсії  $s^2\{y\}$

Номер дослідів	$y(Sm)$	$\langle y \rangle$	$y - \langle y \rangle$	$(Y - \langle Y \rangle)^2$
1	8,2	8,583	-0,383	0,147
2	7,6		-0,983	0,966
3	8,9		0,317	0,100
4	8,4		-0,183	0,033
5	9,1		0,517	0,267
6	9,3		0,717	0,514

Довірчий інтервал для коефіцієнтів рівняння регресії:

$$\Delta b_i = \pm 2,57 \cdot 0,1592 = \pm 0,409.$$

У зв'язку з тим, що коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{14}$ ,  $b_{15}$ , за абсолютною величиною менше довірчого інтервалу, їх визначено статистично незначними й виключено з рівняння регресії.

Різниця  $b_{0-\langle y \rangle} = 0,061$  менше помилки дослідів  $s\{y\} = 0,64$ , отже, коефіцієнти при квадратичних членах значно не відрізняються від нуля, тому досліджувана залежність з достатньою точністю може бути апроксимована поліномом першого ступеня і не потрібно переходити до квадратичної моделі.

Для перевірки адекватності рівняння регресії обчислено дисперсію  $S^2_{ad}$  адекватності:  $S^2_{ad} = 0,2711$ .

Адекватність рівняння регресії перевірено за  $F$ -критерієм. Знайдено розрахункове значення  $F$ -критерієм:

$$F_p = \frac{S^2_{\hat{a}\hat{a}}}{S^2_y} = \frac{0,2711}{0,406} = 0,67.$$

Табличне значення  $F_m$ -критерію при 5%-вому рівні значущості дорівнює 4,9, так як  $F_p < F_m$ , то модель є адекватною.

Рівняння (3.4) з урахуванням відношення (3.13) можна представити наступним виразом:

$$S_m = -116,7 + 0,032 \cdot P_e - 106 \cdot S \cdot n + -0,275n + 35,5 \cdot R_{av} + 5,787 \cdot S_{me} - 0,00069 \cdot P_e \cdot n + 429 \cdot S \cdot R_{av} - 23,3 \cdot S \cdot S_{me} + 0,0896 \cdot R_{av} \cdot n - 2,118 \cdot R_{av} \cdot S_{me} + 3,17 \cdot n \cdot S - 0,00245 \cdot n \cdot S_{me} \quad (3.11)$$

Визначення залежності поверхневої мікротвердості від режимів оброблення і параметрів початкової шорсткості поверхні.

В результаті розрахунків були отримані наступні значення коефіцієнтів:

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
3522,50	498,75	-180,00	-60,00	30,00	1,25
$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{15}$		
-211,25	-26,25	-8,75	-5,00		
$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$			
5,00	27,50	8,75			
$b_{34}$	$b_{35}$				
5,00	11,25				
$b_{45}$					
21,25					

Дисперсію  $s^2(y)$  визначали за шістьма паралельними дослідями в центрі плану, тобто за результатами дослідів, виконаних при знаходженні факторів на основних рівнях (таблиця 4.6),  $s^2(y) = 136,7$ .

Довірчий інтервал для коефіцієнтів рівняння регресії  $\Delta b_i = \pm 2,57 \cdot 2,92 = \pm 7,51$ .

Середня квадратична помилка у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії для  $y$  виявилася такою:

$$s\{b_i\} = +\sqrt{\frac{136,7}{16}} = 2,92 .$$

У зв'язку з тим, що коефіцієнти  $b_5, b_{15}, b_{23}, b_{34}$ , за абсолютною величиною менше довірчого інтервалу, їх визначаємо статистично незначними й виключаємо з рівняння регресії.

Різниця  $b_{0-\langle y \rangle} = 0,83$  менше помилки досліду  $s\{y\} = 11,7$ , отже, коефіцієнти при квадратичних членах значно не відрізняються від нуля, тому досліджувана залежність з достатньою точністю може бути апроксимувати поліномом першого ступеня і не потрібно переходити до квадратичної моделі.

Для перевірки адекватності рівняння регресії обчислюємо дисперсію  $S^2_{ad}$  адекватності:  $S^2_{ad} = 122,5$ .

Таблиця 3.5 – Допоміжна таблиця для розрахунку дисперсії  $s^2\{y\}$

Номер	У (Нц)	$\langle y \rangle$	$y - \langle y \rangle$	$(y - \langle y \rangle)^2$
1	3530	3521,67	8,333	69,439
2	3510		-11,667	136,119
3	3510		-11,667	136,119
4	3520		-1,667	2,779
5	3540		18,333	336,099
6	3520		-1,667	2,779

Адекватність рівняння регресії перевіряємо за  $F$ -критерієм. Знаходимо розрахункове значення  $F$ -критерію:

$$F_p = \frac{S^2_{aa}}{S^2_y} = \frac{122,5}{136,7} = 0,9$$

Табличне значення  $F_m$ -критерію при 5%-вому рівні значущості рівне 4,9, так як  $F_p < F_m$ , тому модель є адекватною.

Рівняння (4.3) з урахуванням відношення (4.9) представимо наступним виразом:

$$\begin{aligned} H\mu = & 3601 + 77,4 \cdot P_\epsilon - 3910 \cdot S - 2,04 \cdot n - 1193 \cdot R_{av} - 41 \cdot S_{m\epsilon} - 0,019 \cdot P_\epsilon \cdot n - \\ & - 1,75 \cdot P_\epsilon \cdot R_{av} + 10\,185 \cdot S \cdot R_{av} + 100 \cdot S \cdot S_{m\epsilon} + 0,032 \cdot n \cdot S_{m\epsilon} + \\ & + 16,4 \cdot R_{av} \cdot S_{m\epsilon} - 626 \cdot P_\epsilon \cdot S \end{aligned} \quad (3.12)$$

### **Висновки по розділу 3**

В третьому розділі магістерської роботи розроблено план проведення експерименту, методика обробки даних та результати. Проведений експеримент дозволив визначити оптимальні режими обробки поверхонь тертя підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин.

## ВИСНОВКИ

Встановлено, що параметри чистової обробки поверхонь тертя підшипникових вузлів мобільних сільськогосподарських машин суттєво впливають на якість поверхонь і в подальшому визначають їх зносостійкість та довговічність.

За результатами експериментальних досліджень та математичного моделювання одержано емпіричні залежності параметрів мікрогеометрії поверхневого шару після вигладжування від режимів  $P$ ,  $s$ ,  $n$  для вигладжувальної операції з використанням інструменту з синтетичного алмазу.

Запропонована оригінальна конструкція державки вигладжувача, яка дозволяє згладжувати вібрації в зоні вигладжування.. Використання державки покращило якість поверхневого шару по  $R_a$  на 12-18%.

Експериментальними дослідженнями процесу вигладжування робочих поверхонь кілець доведено адекватність математичної моделі динаміки вигладжування. Розбіжність теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень не перевищує 11%.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. Москва : Машиностроение, 1981. 244с.
2. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. Москва : Машиностроение, 1981. 160 с.
3. Скобло Т.С. Обоснование финишной операции при обработке поверхностей деталей восстановленных наплавкой. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні»* 2011. №118. С.17-20.
4. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. Москва : Машиностроение, 1978. 232 с.
5. Барац Ф. Я. Исследование качества отделочно-упрочняющей обработки быстрорежущей стали. *Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. трудов.* Саратов: СГТУ, 2005. С. 127-131.
6. Головань А. Я. Алмазное точение и выглаживание.. Москва : Машиностроение, 1976. 112 с.
7. Маликов В. П. Алмазное выглаживание инструментом с плоской рабочей поверхностью. *Вестник машиностроения.* 2016. № 8. С. 76-80.
8. . Самок Г. С., Полетаев В. А. Упрочнение поверхностей деталей электронасосов комбинированным способом. *Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. статей.* С. 121–124.
9. Степанов, Ю. С. Оптимизация конструкции комбинированного инструмента для токарной обработки и алмазного выглаживания торцовых поверхностей деталей из меди. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2011. № 8. С. 15-20.
10. Губанов В.Ф. Вибрации при механической обработке: физика процесса и качество поверхности. *Технология машиностроения.* 2005. №2. С.27-33.

11. Губанов В. Ф. Технологическая наследственность при выглаживании. *Технология машиностроения*. 2005. №1. С.22-23.
12. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев : Наукова думка, 1984. 272 с.
13. Биргер И. А. Остаточные напряжения. Москва : Машиностроение, 1963. 232 с.
14. Давиденков Н. Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений. *Заводская лаборатория*. 1959. № 3. С. 318–319. 3
15. Рязанова-Хитровская Н. В. Исследование напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2016. С. 151-159.
16. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. Москва : Машиностроение, 1972. 105 с.
17. Титов В.А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2009. № 32. С. 78-86.
18. Allen Theodore. Introduction to Engineering Statistics and Lean Six Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems. 3rd Edition. Springer, 2018. 656 p
19. Bartos B. J., McCleary R., McDowall D. Design and analysis of time series experiments. Oxford: Oxford University Press, 2017. 393 p.
20. Ghosh S., Rao C. R. Design and Analysis of Experiments. Elsevier Science. 1996. 1228 p.