

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«___» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Дослідження впливу методів вимірювання на параметри шорсткості сталі 45 після точіння» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-31 _____ Пилипенка Артура Миколайовича _____

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Артур ПИЛИПЕНКО

Керівник _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ, _____
к. т. н., доц. Христина БЕРЛАДІР _____

Нормоконтроль _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ _____
к. т. н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА
«___» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Пилипенко Артур Миколайович

1. Тема проєкту (роботи) «Дослідження впливу методів вимірювання на параметри шорсткості сталі 45 після точіння», затверджена наказом по університету від 22.10.2024 р. № 1085-VI.
2. Термін здачі студентом закінченого проєкту(роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технологічна система «токарний верстат – інструмент», заготовка у вигляді круглого прутка зі сталі 45.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
 - 1) Аналіз літературних джерел за темою роботи.
 - 2) Викладення загальної методики й основних методів досліджень.
 - 3) Експериментальні дослідження та узагальнення результатів.
 - 4) Економічна частина.
 - 5) Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Обов'язковими є таблиці з хімічним складом матеріалів, мікрофотографії структури матеріалу, графіки виявлених залежностей, зображення основного і

допоміжного обладнання, яке використовували під час проведення експериментів.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із значенням розділів проєкту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	10.11.2024 р.	
Економічна частина	Берладір Х. В.	16.11.2024 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження	жовтень 2024 р.	Виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	листопад 2024 р.	Виконано
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	листопад 2024 р.	Виконано
4	Економічна частина	грудень 2024 р.	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	грудень 2024 р.	Виконано

7. Дата видачі завдання

Студент _____
(підпис)

Керівник проєкту _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Пилипенко Артур Миколайович. Дослідження впливу методів вимірювання на параметри шорсткості сталі 45 після точіння. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 Матеріалознавство. – Сумський державний університет, 2024.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню якості поверхні сталі 45 після точіння шляхом мікроструктурного аналізу матеріалу, визначення параметрів поверхневого зносу і шорсткості поверхні та їх оптимізації.

Під час точіння сталі 45 відбувається зміна мікрогеометрії поверхні через механічне деформування, що може призвести до наклепу — підвищення твердості та зміни структури на поверхні. Процес точіння також може викликати термічні зміни, які впливають на формування ферито-перлітних структур. Методами електронної мікроскопії виявлено появу різних дефектів, які можуть виникати на сталій обробленій поверхні після точіння, та пластичну деформацію в локалізованих місцях.

Точіння також впливає на мікрогеометрію поверхні, що характеризується варіабельністю значень шорсткості. Вона визначається наявністю мікронерівностей, які можуть змінюватися в залежності від параметрів обробки (швидкість різання, подача тощо). Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання.

Запропонована методологія математичної оптимізації довела свою ефективність у вирішенні задачі встановлення залежності вхідних технологічних факторів з вихідними параметрами як практичне дослідження в матеріалознавстві і технології конструкційних матеріалів.

Ключові слова: шорсткість, сталь 45, точіння, мікроструктура, ферито-перлітна структура, дефект, пластична деформація, поверхневий знос, оптимізація.

ABSTRACT

Pylypenko Artur Mykolayovych. Study of the influence of measurement methods on the roughness parameters of steel 45 after turning. – Manuscript.

Qualification work for master's qualification in specialty 132 Materials Science. – Sumy State University, 2024.

The qualification work is dedicated to the study of the surface quality of steel 45 after turning by microstructural analysis of the material, determination of surface wear and surface roughness parameters and their optimization.

During the turning of steel 45, the micro geometry of the surface changes due to mechanical deformation, which can lead to hardening – an increase in hardness and a change in the structure on the surface. The turning process can also cause thermal changes that affect the formation of ferrite-pearlite structures. Electron microscopy methods revealed the appearance of various defects that can occur on the treated steel surface after turning, and plastic deformation in localized places.

The proposed methodology of mathematical optimization has proven its effectiveness in solving the problem of establishing the dependence of input technological factors on output parameters as a practical study in materials science and technology of structural materials.

Keywords: roughness, steel 45, turning, microstructure, ferrite-pearlite structure, defect, plastic deformation, surface wear, optimization.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра вміщує **66 сторінок, зокрема 14 рисунків, 12 таблиць, список із 31 використаних джерел на 4 сторінках.**

Мета роботи – дослідження якості поверхні сталі 45 після точіння шляхом мікроструктурного аналізу матеріалу, визначення параметрів поверхневого зносу і шорсткості поверхні та їх оптимізації.

Об’єкт дослідження – залежності впливу параметрів процесу точіння на мікроструктурний стан поверхні сталі 45, варіабельність значень параметрів шорсткості і поверхневого зносу, можливості їх подальшої оптимізації.

Предмет дослідження – зразки зі сталі 45 після точіння.

Методи дослідження. Шорсткість поверхні і знос поверхні ріжучої пластини вимірювали відповідно до чинних стандартів. Мікроструктурний аналіз проводили за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Експериментальна дослідницька частина була спланована з використанням методу Тагучі для трьох вхідних факторів.

Наукова новизна отриманих результатів. Встановлено вплив параметрів процесу точіння на мікроструктурний стан поверхні сталі 45. Виявлено зміну мікрогеометрії поверхні через механічне деформування, що призводить до появи наклепу, локальної пластичної деформації і дефектності поверхневого шару. Варіабельність параметрів шорсткості і поверхневого зносу визначається параметрами обробки (вхідних факторів). Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання.

Ключові слова: шорсткість, сталь 45, точіння, мікроструктура, ферито-перлітна структура, дефект, пластична деформація, поверхневий знос, оптимізація..

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	12
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
1.1 Поняття параметрів шорсткості поверхні у матеріалознавстві	12
1.2 Вплив параметрів шорсткості на якість обробки поверхонь при точінні .	13
1.3 Методи вимірювання шорсткості поверхні	15
1.3.1 Контактні методи вимірювання шорсткості	16
1.3.2 Безконтактні методи вимірювання шорсткості	18
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2	22
ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
2.1 Характеристика матеріалу для дослідження	22
2.2 Обладнання для проведення випробувань.....	23
2.3 Методи і методика досліджень	24
2.4 Планування експерименту.....	26
2.5 Оптимізація результатів досліджень	27
Висновки до розділу 2	30
РОЗДІЛ 3	31
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ	
3.1 Випробування на поверхневий знос і шорсткість	31
3.2 Мікроструктурний аналіз сталі 45 після точіння.....	34
3.3 Математична оптимізація результатів вимірювання зносу і шорсткості ..	38
3.4 Підтверджувальний експеримент	42
3.5 Порівняння безконтактного та контактних методів вимірювання параметрів шорсткості	43
Висновки до розділу 3	46

РОЗДІЛ 4	47
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	47
Висновки до розділу 4	50
РОЗДІЛ 5	51
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	51
5.1 Загальні вимоги до технологічних процесів	51
5.2 Вимоги до охорони праці під час оброблення металів різанням	54
5.3 Заходи щодо охорони навколишнього середовища	57
Висновки до розділу 5	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63

СуммДу

ВСТУП

Дослідження факторів впливу на параметри шорсткості після точіння є надзвичайно актуальним у сучасному матеріалознавстві. Шорсткість поверхні є критично важливим параметром, що впливає на механічні властивості виробів, включаючи втомну міцність, зносостійкість та корозійну стійкість.

Вибір методу вимірювання шорсткості також має значний вплив на результати. Існують різні методи аналізу, включаючи контактні та безконтактні способи. Технологічні параметри обробки, такі як швидкість різання і подача, суттєво впливають на шорсткість обробленої поверхні. Тому важливо враховувати ці фактори при виборі режимів точіння для досягнення бажаних характеристик поверхні. Характеристики шорсткості поверхні повинні бути стандартизовані та проаналізовані в технологічних дослідженнях і контролювані під час виробництва.

Актуальність дослідження полягає в необхідності забезпечення високих експлуатаційних характеристик деталей машин. Визначення параметрів поверхневого зносу та шорсткості є критично важливим для оцінки експлуатаційних характеристик деталей. Ці показники дозволяють оцінити якість обробленої поверхні та її здатність витримувати навантаження без значного зносу. Вивчення мікроструктури допомагає зрозуміти, як різні технологічні процеси впливають на зносостійкість і тривалість служби деталей. Мікроструктурний аналіз є ключовим інструментом для оцінки якості обробленої поверхні. Він не лише допомагає виявити дефекти та зміни у структурі матеріалу, але й забезпечує можливість оптимізації технологічних процесів для досягнення високої якості і довговічності виробів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження якості поверхні сталі 45 після точіння шляхом мікроструктурного аналізу матеріалу, визначення параметрів поверхневого зносу і шорсткості поверхні та їх оптимізації.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні завдання:

- 1) провести експериментальні випробування поверхневого зносу та шорсткості на сталі 45 після точіння;
- 2) дослідити якість поверхні сталі 45 після точіння шляхом мікроструктурного аналізу поверхні матеріалу;
- 3) проведення математичної оптимізації для факторів зносу і шорсткості;
- 4) порівняння безконтактного та контактних методів вимірювання параметри шорсткості.

Об'єкт дослідження – залежності впливу параметрів процесу точіння на мікроструктурний стан поверхні сталі 45, варіабельність значень параметрів шорсткості і поверхневого зносу, можливості їх подальшої оптимізації.

Предмет дослідження – зразки зі сталі 45 після точіння.

Методи дослідження. Шорсткість поверхні і знос поверхні ріжучої пластини вимірювали відповідно до ISO 3685. Мікроструктурний аналіз досліджували за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primo-tech D/A ESD та скануючої електронної мікроскопії JEOL JSM 7000F.. Експериментальна дослідницька частина була спланована з використанням Taguchi L16 OA (ортогональна матриця) для трьох вхідних факторів. Технологічні процеси з різними вихідними даними були виражені параметром сірої реляційної оцінки.

Наукова новизна роботи. Встановлено вплив параметрів процесу точіння на мікроструктурний стан поверхні сталі 45. Виявлено зміну мікрогеометрії поверхні через механічне деформування, що призводить до появи наклепу, локальної пластичної деформації і дефектності поверхневого шару. Варіабельність параметрів шорсткості і поверхневого зносу визначається параметрами обробки (вхідних факторів). Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання.

Практична цінність роботи. Запропонована методологія математичної оптимізації довела свою ефективність у вирішенні задачі встановлення

залежності вхідних технологічних факторів з вихідними параметрами як практичне дослідження в матеріалознавстві і технології конструкційних матеріалів.

Особистий внесок. Автору належить аналіз літературних даних, визначення мети та постановки завдання дослідження, виготовлення зразків, проведення випробувань та оформлення роботи.

Кваліфікаційна робота магістра вміщує 66 сторінок, зокрема 14 рисунків, 12 таблиць, список із 31 використаних джерел на 4 сторінках.

СумДУ

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Поняття параметрів шорсткості поверхні у матеріалознавстві

Параметр шорсткості поверхні деталей машин є одним з провідних показників якості, надійності та терміну служби продукції у матеріалознавстві та машинобудуванні [1]. Шорсткість впливає на основні експлуатаційні характеристики деталей і вузлів: опір втомі, зносо- і корозійну стійкість, надійність посадки, контактну жорсткість, теплопровідність [1, 2]. Тому характеристики шорсткості поверхні повинні бути стандартизовані та проаналізовані в технологічних дослідженнях і контролювані під час виробництва.

Параметри шорсткості в Україні нормуються ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури [3].

Стандартом визначено шість параметрів оцінки шорсткості поверхні (рис. 1.1).

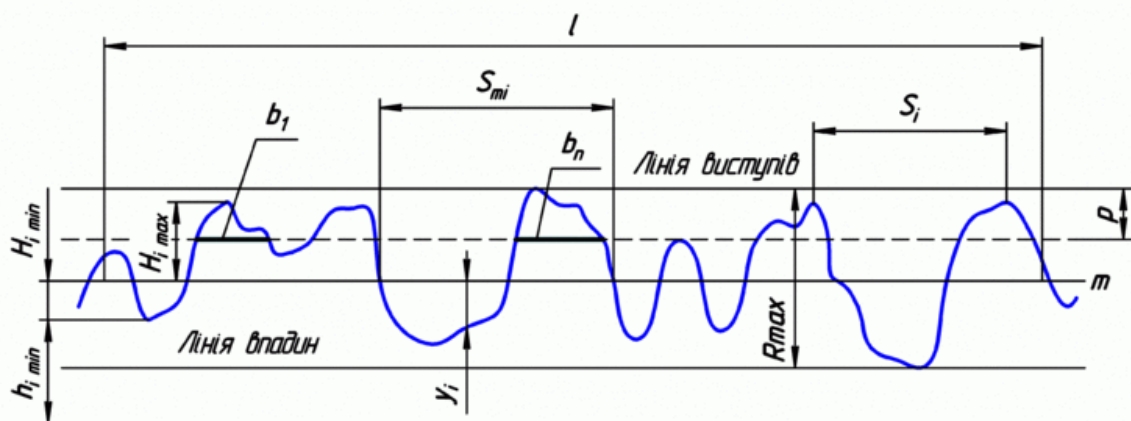


Рисунок 1.1 – Нормальний профіль та параметри шорсткості

[<https://uk.wikipedia.org/>]

1. Висотні параметри:
 - Середнє арифметичне відхилення профілю (R_a): середнє значення абсолютних відхилень профілю від середньої лінії.
 - Висота нерівностей профілю за 10 точками (R_z): сума абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших западин.
 - Максимальна висота нерівностей (R_{max}): найбільше відхилення профілю від середньої лінії.
2. Крокові параметри:
 - Середній крок нерівностей профілю (S_m): середнє значення відстаней між вершинами нерівностей.
 - Середній крок по середній лінії (S): аналогічно, але вимірюється по середній лінії профілю.
3. Опорні параметри:
 - Відносна опорна довжина профілю (t_p): співвідношення між опорною довжиною профілю та базовою довжиною.

Розуміння параметрів шорсткості поверхні є критично важливим для матеріалознавства, оскільки вони безпосередньо впливають на функціональні властивості матеріалів і їх застосування в промисловості. Правильний вибір і контроль цих параметрів дозволяє забезпечити високу якість продукції та її ефективність в експлуатації.

1.2 Вплив параметрів шорсткості на якість обробки поверхонь при точінні

Серед найпоширеніших способів виготовлення деталей із заданими геометричними параметрами є токарна обробка металу [4], яка дозволяє отримати поверхню з необхідною шорсткістю.

Шорсткість поверхні при обробці заготовки залежить від технологічного процесу: режимів обробки (швидкість різання, подача) [5]; матеріалу і якості поверхні інструменту [6, 7]; механічні властивості, хімічний склад і структура

матеріалу заготовки [8]; складу мастильно-охолоджуючої рідини тощо [9]. Однак після обробки металу будь-яка поверхня характеризується набуттям макро- і мікро неоднорідності, яких немає на ідеально гладкій поверхні. Таким чином, визначення шорсткості поверхні є одним із провідних параметрів металевих виробів.

Шорсткість обробки поверхонь при точінні на токарному верстаті утворюється у вигляді безлічі нерівностей подібних до гвинтових виступів і гвинтових канавок (рис. 1.2, а), що нагадують різьблення, які цілком виразно помітні при великій подачі S і виявляються лише за допомогою спеціальних приладів, якщо подача невелика. Подібні нерівності розташовані в напрямку подачі і утворюють поперечну шорсткість, на відміну від поздовжньої шорсткості (рис. 1 б), що утворюється нерівностями в напрямку швидкості різання V .

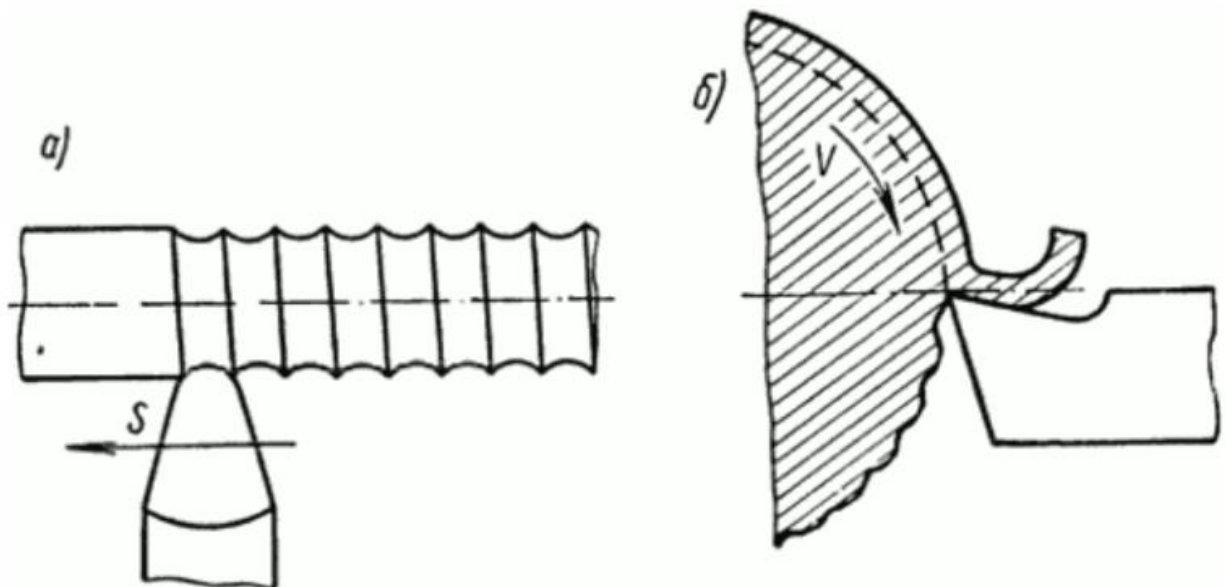


Рисунок 1.2 – Поперечна (а) та поздовжня (б) шорсткості, що виходять при токарній обробці поверхонь.

При обробці на токарному верстаті найбільше значення має поперечна шорсткість обробленої поверхні. Тому чистота поверхонь при токарній

обробці характеризується, головним чином, формою та розмірами гвинтових виступів, званих мікронерівністю. Висота мікронерівності залежить різною мірою від багатьох чинників у процесі різання і тому її складно визначити розрахунком, а знаходиться вона лише експериментальним шляхом. При токарній обробці більш в'язких металів, наприклад маловуглецевих сталей, висота шорсткості виходить більшою, ніж при обробці крихких металів, наприклад, чавуну. При обробці крихких металів (при стружці надлому) на обробленій поверхні виходять іноді дуже помітні поглиблення, що утворюють поздовжню шорсткість. Шорсткість поверхні зменшується, якщо матеріал (сталь) підданий термічній обробці, що підвищує однорідність його структури.

Швидкість різання суттєво впливає на утворення шорсткості поверхні. При швидкості різання до 3-5 м/хв розміри шорсткості незначні; із збільшенням швидкості різання нерівності зростають; при підвищенні швидкості різання до 60-70 м/хв висота нерівностей зменшується, і при швидкості близько 70 м/хв шорсткість поверхні виходить найменшою. Подальше підвищення швидкості різання незначно впливає на шорсткість обробленої поверхні. Наявність наросту на різці збільшує шорсткість поверхні, обробленої цим різцем.

Важливим етапом токарної операції є контроль якості продукції. Фізичні, механічні та геометричні властивості деталей і виробів значною мірою впливають на якість і надійність деталей машинобудування. По-перше, точність їх виготовлення – це геометричні розміри і шорсткість деталей; від цього залежить якість, термін служби, функціональні властивості обладнання.

Контроль якості результатів точіння необхідно проводити за допомогою приладів, що вимірюють шорсткість поверхні.

1.3 Методи вимірювання шорсткості поверхні

На сьогоднішній день для вимірювання шорсткості поверхні різних матеріалів широко застосовуються контактні методи з використанням

профілометрів і профілографів [10–13] і безконтактні методи з використанням оптичних приладів [14–18].

1.3.1 Контактні методи вимірювання шорсткості

До засобів послідовного перетворення профілю відносяться контактні методи вимірювання шорсткості поверхні [10]. Ці методи передбачають безпосередній контакт вимірювального елемента з поверхнею.

Щуповий метод вимірювання шорсткості поверхні є одним із основних контактних методів, що використовуються для оцінки якості поверхні матеріалів. Цей метод передбачає використання спеціальних приладів, зокрема профілометрів, які здійснюють вимірювання шляхом контакту щупа з поверхнею.

Профілометр – це чутливий датчик, що містить гостру алмазну голку з обмацувальною головкою. Суть вимірювання полягає в переміщенні алмазної голки паралельно досліджуваній поверхні. Механічні коливання, які виникають через нерівності, віддаються в датчик, після чого перетворюються на електричний сигнал і за допомогою посилення вимірюються. Таким чином дослідження поверхні проходить наступною черговою: спочатку обмацується поверхня, що вимірюється, кілька разів, і тільки після цього на підставі отриманих результатів обчислюється усереднене значення параметра шорсткості.

Значною відмінністю профілографа є його здатність не просто виміряти нерівність, а записати значення шорсткості поверхні у вибраному масштабі.

Профілометр і профілограф є двома різними типами приладів, призначених для вимірювання шорсткості поверхні, але вони мають суттєві відмінності в способі відображення результатів та конструкції.

Основна різниця між профілометром і профілографом полягає в способі представлення результатів: профілометр надає числові дані, тоді як профілограф створює графічний профіль шорсткості.

Зокрема, в роботі [11] для високоточного вимірювання шорсткості поверхні сталі AISI 1045 використовували вимірювальний прилад Talysurf. Результати експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів обробки на шорсткість поверхні, виміряну контактними методами, наведено також для вуглецевої сталі AISI 1045 у [12, 13]. Автори відзначили декілька переваг використання контактного методу вимірювання.

Таким чином, до переваг використання контактних методів вимірювання шорсткості можна віднести:

- високу точність вимірювань.

Контактні профілометри забезпечують високу точність завдяки малому радіусу кривизни алмазної голки, що використовується для вимірювання. Це дозволяє отримувати детальні дані про мікронерівності поверхні.

- простоту в застосуванні.

Контактні методи є відносно простими у використанні та не вимагають складного обладнання. Вони можуть бути використані в різних умовах, включаючи лабораторії та виробничі цехи

- сумісність з різними матеріалами.

Ці методи можуть бути застосовані до різних типів матеріалів, включаючи метали та пластики, що робить їх універсальними для багатьох галузей.

- надійність результатів.

Контактні вимірювання забезпечують стабільні результати навіть на забруднених або нерівних поверхнях, оскільки вони безпосередньо контактують з об'єктом вимірювання.

- використання стандартів.

Багато сучасних стандартів розроблені саме для контактних методів, що підтверджує їхню надійність і прийнятність у промислових застосуваннях.

Хоча контактні методи мають свої переваги, вони також мають недоліки, такі як можливість пошкодження поверхні деталі під час вимірювання та тривалий час процесу вимірювання порівняно з безконтактними методами.

1.3.2 Безконтактні методи вимірювання шорсткості

Безконтактні методи вимірювання шорсткості поверхні є важливими для оцінки якості матеріалів без фізичного контакту з ними. Ці методи забезпечують точність вимірювань та зберігають цілісність досліджуваних поверхонь.

Основні безконтактні методи вимірювання шорсткості представлені в табл. 1.1.

Автори [14] представили оглядову статтю, в якій всебічно охарактеризовано безконтактні методи вимірювання шорсткості поверхні на основі оптичної інтерферометрії. Автори також детально описали принципи роботи кожної техніки та доповнили їх прикладами в кожній категорії.

Авторами [15] розроблено модифікований оптичний метод вимірювання шорсткості поверхні та представлено його реалізацію. Відзначено високий ступінь збігу оптично визначених параметрів зі стандартними значеннями поверхні.

В роботі [16] запропонували новий безконтактний метод вимірювання шорсткості поверхні на основі онлайн-моніторингу. У статті представлено детальний теоретичний підхід до техніки, дані моделювання та експериментальні результати для визначеного набору шорсткості поверхні.

У роботі [17] продемонстровано ефективність використання методу лазерної спекл-візуалізації. В експериментах вони використовували єдине лазерне джерело, що показало перспективність подальшого використання запропонованого методу. Конструкцію 3D лазерного профілометра для вимірювання шорсткості описано та проаналізовано в [18].

У роботі [19] автори порівнювали якість вимірювання шорсткості поверхні тонкого металевого покриття на композитній підкладці за допомогою профілометра та оптичної когерентної томографії. За результатами експериментів встановлено перевагу використання безконтактного методу вимірювання поверхневих шарів металу, що забезпечує більш достовірні дані.

Таблиця 1.1 – Характеристика основних безконтактних методів вимірювання шорсткості [20].

Метод	Характеристика
Оптичні методи	Використовують світло для вимірювання шорсткості, включаючи інтерферометри білого світла та лазерні скануючі мікроскопи. Ці пристрої здатні точно визначати параметри шорсткості на певних площах.
Растровий метод	Застосування растрової сітки, що накладається на поверхню, для аналізу нерівностей через відбиття світла.
Лазерна профілометрія	Метод, що використовує лазерний промінь для створення профілю поверхні. Лазерний промінь відбивається від поверхні, і зміщення зображення використовується для визначення висоти нерівностей.
Електронна мікроскопія	Використання електронного мікроскопа для детального аналізу шорсткості на нано- та мікрорівнях. Цей метод дозволяє отримувати високу роздільну здатність зображень.
Методи рефлектометрії	Вимірювання шорсткості за допомогою аналізу параметрів відбитого світла від поверхні. Цей підхід має низьку чутливість до вібрацій і дозволяє проводити вимірювання на різних відстанях.
Мікроінтерференційний метод	Застосування інтерферометра для отримання інтерференційних картин, які дозволяють визначити параметри шорсткості на основі викривлення смуг у місцях нерівностей.

До переваг використання безконтактних методів вимірювання шорсткості можна віднести:

- відсутність пошкоджень поверхні.

Безконтактні методи, такі як оптичні та лазерні, не вимагають фізичного контакту з поверхнею, що запобігає появі подряпин або інших ушкоджень.

- швидкість вимірювань.

Зазвичай, безконтактні методи забезпечують швидший процес вимірювання порівняно з контактними, оскільки не потребують тривалого налаштування або підготовки.

- дистанційне сканування.

Ці методи дозволяють проводити вимірювання на відстані, що робить їх зручними для використання в умовах, де доступ до поверхні обмежений або небезпечний.

- автоматизація та обробка даних.

Безконтактні системи часто інтегруються з комп'ютерними технологіями для автоматичної обробки даних, що підвищує ефективність та точність аналізу.

- висока точність.

Хоча контактні методи можуть мати високу точність, сучасні безконтактні технології також забезпечують достатню точність для багатьох застосувань, особливо в умовах виробництва.

Ці переваги роблять безконтактні методи вимірювання шорсткості популярними у промисловості та наукових дослідженнях.

Висновки до розділу 1

Параметр шорсткості поверхні деталей машин є одним з провідних показників якості, надійності та терміну служби продукції. Шорсткість впливає на основні експлуатаційні характеристики деталей і вузлів: опір втомі, зносо- і корозійну стійкість, надійність посадки, контактну жорсткість, теплопровідність.

Розуміння параметрів шорсткості поверхні є критично важливим для матеріалознавства, оскільки вони безпосередньо впливають на функціональні властивості матеріалів і їх застосування в промисловості. Правильний вибір і контроль цих параметрів дозволяє забезпечити високу якість продукції та її ефективність в експлуатації.

Для вимірювання шорсткості поверхні різних матеріалів широко застосовуються контактні методи з використанням профілометрів і профілографів і безконтактні методи з використанням оптичних приладів. Одним з головних недоліків при вимірюванні шорсткості контактним методом є прямий контакт датчиків з поверхнею деталі, що може призвести до появи подряпин на поверхні деталі. Також було відзначено відносно тривалий час процесу вимірювання. Але цей метод забезпечує чіткий профіль хвилі та можливе вимірювання на великій відстані.

Натомість безконтактний метод дозволяє контролювати поверхню таким чином, щоб не пошкодити деталь або виріб у цілому; часу, що витрачається на вимірювання, значно менше, але є обмеження в розмірах об'єктів вимірювання. Безконтактні методи вимірювання шорсткості стають все більш популярними в промисловості завдяки своїй ефективності та точності, що робить їх незамінними в сучасних технологічних процесах.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика матеріалу для дослідження

Пропоновані дослідження організовано за технологічною системою «верстат-інструмент» (рис. 2.1). Цей токарний верстат має сертифіковану загартовану поверхню шпинделя (відповідно до стандарту DIN 55021) з биттям менше 0.009 мм.

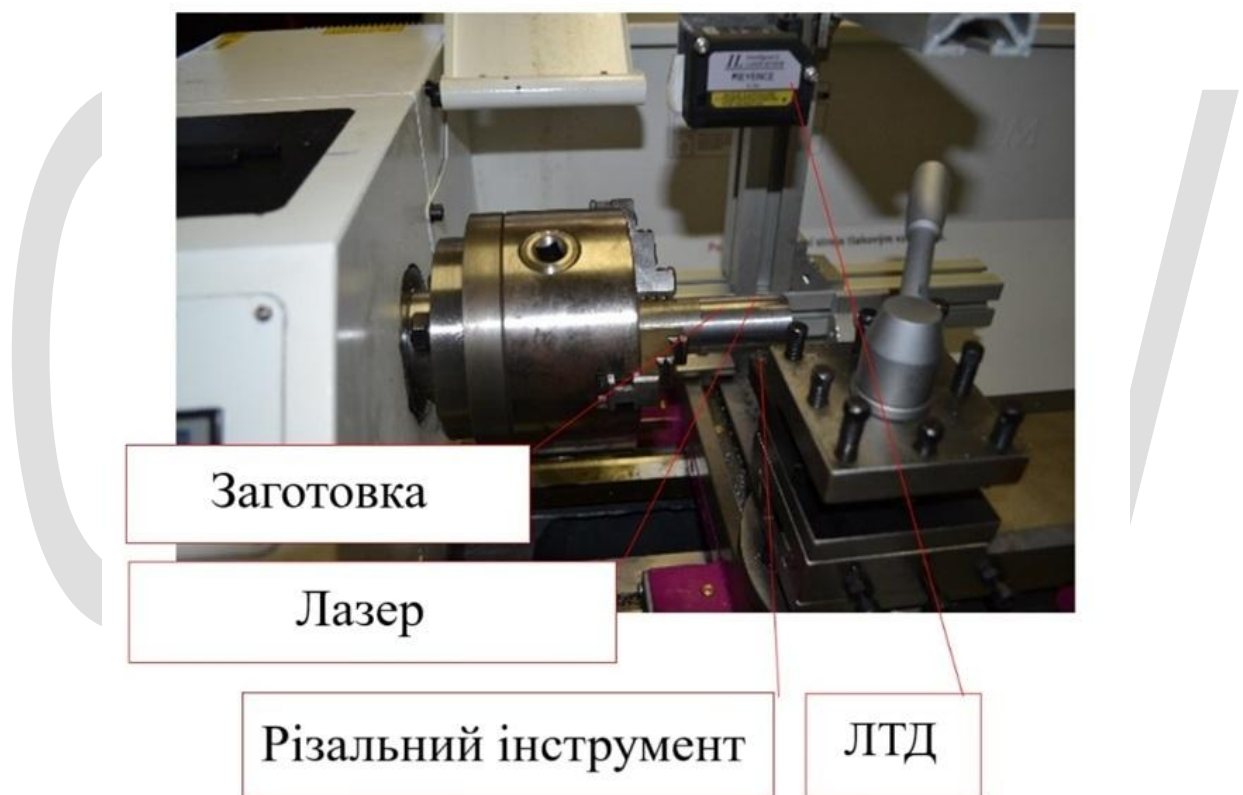


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд і робоча зона верстата Optimum TU 2807.

Заготовка – круглий пруток $d=30 \times 200$ мм, матеріал прутка – сталь 45 (EN 10083-2-91). Хімічний склад сталі представлений в табл. 2.1, властивості сталі – в табл. 2.2.

Ріжучий інструмент – ріжуча пластина SCMTT09T308 TTR – спечений твердий сплав без покриття. Тримач ножа – SSDCN1212K12-M-A.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 45 (EN 10083-2-91).

C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	P, %	S, %
0.42	0.65	0.20	max 0.20	max 0.30	max 0.035	max 0.035

Таблиця 2.2 – Визначені властивості сталі 45

Параметр	Значення
Щільність, г/см ³	7.85
Твердість НВ	max 225
Модуль пружності, ГПа	79
Міцність на вигин, МПа	606
Теплопровідність, Вт/м·К	50

2.2 Обладнання для проведення випробувань

Важливим етапом дослідження є аналіз елементів, що впливають на якість процесу різання [21]. До елементів зони різання відносять ріжучу кромку, стружку та поверхню після різання [22–24].

У цьому дослідженні представлено вимірювальний ефект зміни різальної кромки, особливо її зносу на передній поверхні, і як ці зміни впливають на параметр якості обробленої поверхні (шорсткість поверхні Ra).

Параметр вимірювали після закінчення операції (точіння циліндричної поверхні) на визначеному зразку. Зразок і площа були обрані, виходячи з вимог виробничих компаній, які виготовляють вали з різних матеріалів.

Для експерименту була розроблена мобільна вимірювальна система (рис. 2.2). Базовим елементом вимірювальної системи є лазерний триангуляційний датчик IL100 (виробник Keyence). Його технічні характеристики – діапазон вимірювання 70-130 мм; діаметр плями 400x1350 мм (в залежності від відстані від заготовки); лінійність ± 20 мм; повторюваність 4 мм; вага 75 г.

Вимірювальна система додатково оснащена комунікаційним блоком (для монтажу на DIN-рейку DL-PN1, 150 г) з підсилювачем (IL-1000, 170 г, тип для швидкості зв'язку 500 кбіт/с) [25].



Рисунок 2.2 – Лазерний датчик тріангуляції IL100 і мобільна вимірювальна система [25]: 1 – процесор Siemens-1511C, 2 – модуль зв'язку Keyence CL-3000, 3 – підсилювач Keyence CL-P070N, 4 – модуль зв'язку Keyence DL-PN1, 5 – підсилювач Keyence IL-1000.

2.3 Методи і методика досліджень

Дослідження для перевірки застосування лазерного датчика тріангуляції у вимірюванні параметрів виконано для операції точіння циліндричної поверхні. Для експерименту була обрана сталь 45 (дослідний зразок діаметром 30 мм і довжиною 200 мм). Шорсткість поверхні (R_a) і знос поверхні ріжучої пластини вимірювали відповідно до ISO 3685 (рис. 2.3).

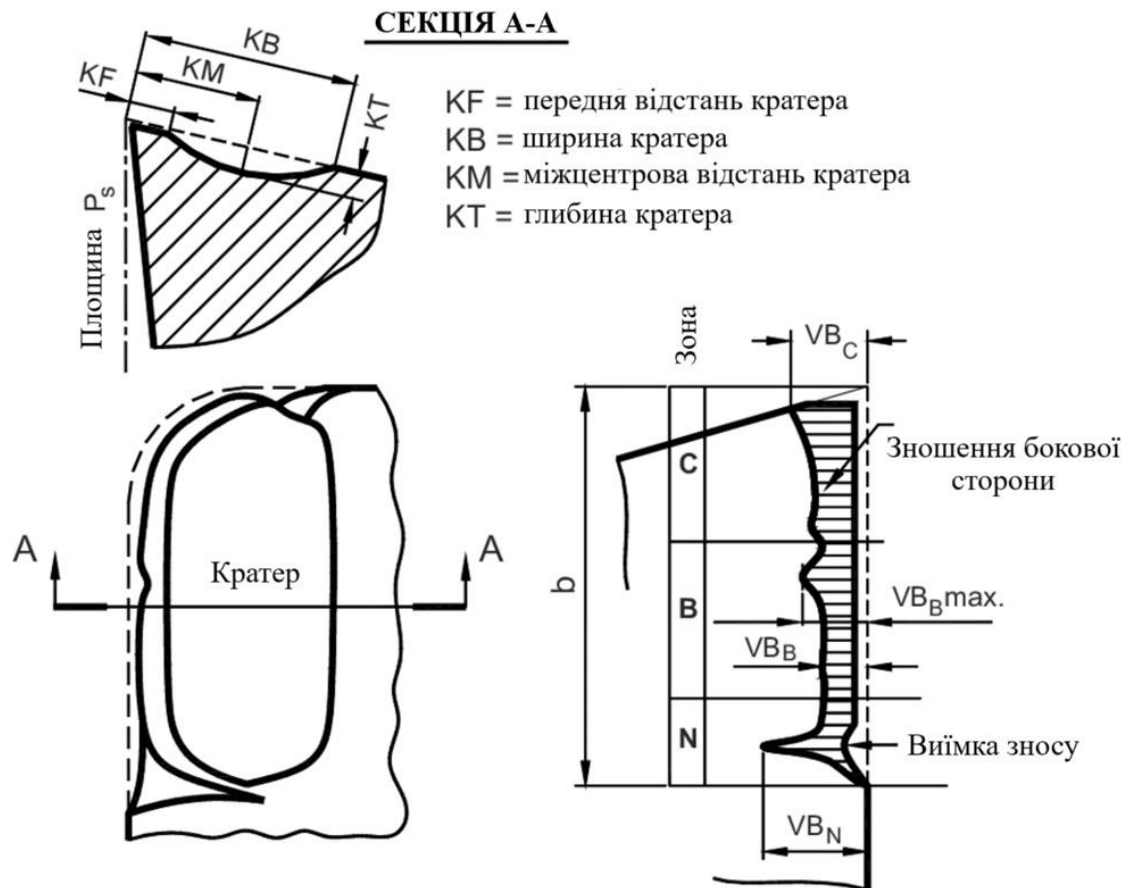


Рисунок 2.3 – Параметри зносу ріжучого інструменту згідно з ISO 3685 [26].

Кожне значення шорсткості поверхні та зносу поверхні ріжучої пластини було отримано з 8 повторень (з використанням двох ріжучих пластин). Шорсткість поверхні вимірювалася безпосередньо в робочій зоні верстата за допомогою лазерного тріангуляційного датчика (після обробки поверхні заготовки без її розкріплення). Лазерні датчики тріангуляції використовують оптичний принцип для вимірювання відстані до поверхні об'єкта. Лазерний промінь, випромінюваний датчиком, відбивається від поверхні і потрапляє на фотоприймач. Вимірювання здійснюється шляхом визначення кута, під яким промінь відбивається, що дозволяє обчислити відстань до об'єкта за допомогою властивостей трикутників

Знос передньої поверхні відрізного диска досліджували за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primo-tech D/A ESD (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Процес дослідження торцевого зносу ріжучої пластини за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primotech D/A ESD.

2.4 Планування експерименту

Експериментальна дослідницька частина була спланована з використанням Taguchi L16 OA (ортогональна матриця) для трьох вхідних факторів: швидкості різання (A), руху (B) і глибини різання (C) на чотирьох рівнях (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Рівні умов процесу різання для ортогональної матриці Taguchi L16.

Рівень параметрів	Швидкість різання A (м/хв)	Переміщення B (мм/об.)	Глибина різання C (мм)
1	25	0.05	0.02
2	50	0.075	0.05
3	75	0.1	0.1
4	100	0.2	0.5

Taguchi L16 OA (ортогональна матриця) представляє в цілому 16 експериментів, які були обточені новою ріжучою кромкою на експериментальному зразку довжиною 200 мм (3 надрізи довжиною 70 мм). Після завершення точіння оброблена поверхня була виміряна лазерним триангуляційним датчиком і контактним ручним вимірювачем шорсткості Mar-Surf PS10. Для обробки результатів вимірювання параметрів Ra і KV використовувалися як середні значення, так і після фільтрації (в основному з точки зору негативного впливу на оброблену поверхню – перераховані в кінці цього дослідження).

2.5 Оптимізація результатів досліджень

Технологічні процеси з різними вихідними даними можуть бути виражені параметром сірої реляційної оцінки (Gray relational grade, GRG) [27]. Метод сірого реляційного аналізу (Grey relational analysis, GRA) може відобразити незрозумілість системної залежності для оцінки кількох вихідних параметрів та оптимізації за допомогою одного параметра. Сірий реляційний аналіз використовує особливу концепцію інформації: ситуації, у яких немає інформації, визначаються як чорні, а ті, що мають ідеальну інформацію, – як білі. Ситуації між цими крайнощами, які містять часткову інформацію, описуються як сірі, туманні або нечіткі. Результат оптимізації кількох комплексних факторів можна перетворити в окрему (індивідуальну) одиничну сіру реляційну оцінку.

Для забезпечення якості обробки даних вхідні дані повинні бути оптимізовані за допомогою сірого реляційного аналізу та передбачати наступні кроки [28]:

1. Визначення вхідних факторів і вихідних параметрів.
2. Визначення кількості рівнів вхідних факторів.
3. Факторний матричний дизайн.

4. Попередня обробка даних — це процес нормалізації даних для зменшення їх мінливості. Після нормалізації даних необхідно їх трансформувати, тобто замінити довідкові дані на порівняльні. Тому необхідно розробити відповідне значення з початкового значення.

Для того, щоб вихідні параметри, призначені для нормалізації, змінилися в прийнятний діапазон, було запропоновано «чим менше, тим краща» методологія (small is better), використовуючи формулу (2.1).

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2.1)$$

де $i = 1, \dots, m$ $k = 1, \dots, n$; m — кількість експериментальних даних; n — кількість параметрів; $x_i^0(k)$ вказує вихідну послідовність; $x_i^*(k)$ вказує послідовність після обробки даних; $\max x_i^0(k)$ — максимальне значення $x_i^0(k)$; $\min x_i^0(k)$ — мінімальне значення $x_i^0(k)$; x_i^0 — необхідне значення $x_i^0(k)$.

Процес обробки даних запропонованого дослідження реалізовувався за такими етапами:

1. Обчислити сірий коефіцієнт відношення $\xi_i(k)$, згідно формули (2.2),
2. Розрахувати сіру реляційну оцінку на основі результатів сірого коефіцієнту відношення,
3. Проаналізувати вхідні параметри за допомогою сірої реляційної оцінки,
4. Розробити оптимальні комбінації вхідних факторів процесу різання.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (2.2)$$

$$\Delta_{oi}(k) = |x_o^*(k) - x_i^*(k)|$$

$$\Delta_{\max} = 1.00, \Delta_{\min} = 0.00$$

де $\Delta_{oi}(k)$ – відхилення послідовності еталонної послідовності $x_0^*(k)$ і послідовності порівняння $x_i^*(k)$; ξ – коефіцієнт ідентифікації і визначається в діапазоні $0 \leq \xi \leq 1$, залежить від вимог системи. Визначення цього коефіцієнта є важливим для демонстрації рівня зв'язку між еталонною послідовністю $x_0^*(k)$ і послідовністю порівняння $x_i^*(k)$; $i=1,2,\dots,m$ а $k=1,2,\dots,n$.

Визначення сірої реляційної оцінки у процедурі сірого реляційного аналізу повинно визначати ступінь впливу між послідовностями вихідних параметрів [$x_0^*(k)$ and $x_i^*(k)$, $i = 1,2,3,\dots,16$].

Визначення сірої реляційної оцінки у процедурі сірого реляційного аналізу полягає у визначенні ступеня впливу між послідовностями вихідних параметрів (3.3):

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2.3)$$

де γ_i – необхідна сіра реляційна оцінка для i -го експерименту, n – кількість вихідних характеристик.

Відповідно до сірої реляційної оцінки визначається оптимальний рівень вхідних технологічних факторів, і його найвищі значення вказують на кращу механічно-функціональну якість поверхні. Далі необхідно розрахувати середні значення сірої реляційної оцінки для кожного рівня вхідних факторів процесу.

Вищі значення середньої сірої реляційної оцінки відповідають комбінації оптимальних факторів. Дизайн оптимальної комбінації після аналізу буде прогнозований:

— дисперсійний аналіз (ANOVA) для оцінки значущості факторів, що впливають на множинні відповіді, на рівні довіри 95%.

— рекомендована важлива інформація про дані експерименту. Р-значення (імовірність значущості) аналізується для оцінки значущості вихідного параметра.

Висновки до розділу 2

Пропоновані дослідження організовано за технологічною системою «верстат-інструмент». Заготовка – круглий пруток $d=30 \times 200$ мм, матеріал прутка – сталь 45 (EN 10083-2-91). Ріжучий інструмент – ріжуча пластина зі спеченого твердого сплаву без покриття.

У цьому дослідженні представлено вимірювальний ефект зміни різальної кромки, особливо її зносу на передній поверхні, і як ці зміни впливають на параметр якості обробленої поверхні (шорсткість поверхні R_a). Параметр вимірювали після закінчення операції (точіння циліндричної поверхні) на визначеному зразку. Зразок і площа були обрані, виходячи з вимог виробничих компаній, які виготовляють вали з різних матеріалів.

Для експерименту була розроблена мобільна вимірювальна система. Базовим елементом вимірювальної системи є лазерний триангуляційний датчик IL100.

Шорсткість поверхні вимірювалася безпосередньо в робочій зоні верстата за допомогою лазерного триангуляційного датчика (після обробки поверхні заготовки без її розкріплення). Знос передньої поверхні відрізного диска досліджували за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primo-tech D/A ESD.

Технологічні процеси з різними вихідними даними були виражені параметром сірої реляційної оцінки, яка може відобразити незрозумілість системної залежності для оцінки кількох вихідних параметрів та оптимізувати за допомогою одного параметра.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Випробування на поверхневий знос і шорсткість

Експериментальні результати поверхневого зносу та шорсткості поверхні наведені в табл. 3.1 [29].

Аналіз отриманих даних з рис. 3.1 для Ra та рис. 3.2 для KV показав, що результуючий параметр KV знос передньої поверхні поступово зростає зі зростанням значень параметрів швидкості різання, переміщення та глибини різання. Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання (рис. 3.1).

Шорсткість поверхні значно зменшується при зміні швидкості різання від 1 до 4 рівнів, що однаково для 2-4 ступенів подачі. Найнижче значення було зафіксовано при швидкості різання рівня 4. Під час переміщення нижчі значення вимірювалися від 2 до 4 рівнів. Найменше значення шорсткості поверхні було зафіксовано при переміщенні 0.2 мм. Вплив глибини різання на шорсткість поверхні відбувається поступово від 1 до 4 рівнів.

Найменше середнє значення шорсткості поверхні було виміряно при швидкості різання 100 м/хв і становило 4.648 мкм.

Графіки основних ефектів показують невизначеність рівнів технологічних параметрів, які необхідно розрахувати на токарну обробку сталі 45, як стандарту групи матеріалів – сталь, які показують, що для певних нижчих рівнів параметрів – знос передньої поверхні нижчий.

Таблиця 3.1 – Експериментальні результати для параметрів – знос передньої поверхні та шорсткість поверхні згідно ортогональної матриці Taguchi L16.

Кількість експериментів	Швидкість різання А (м/хв)	Переміщення В (мм/об.)	Глибина різання С (мм)	КВ (мм)	Ra (μm)
	Фактори процесу			Експериментальні результати	
1	25	0.05	0.02	0.052	5.102
2	25	0.075	0.05	0.048	5.427
3	25	0.1	0.10	0.084	5.364
4	25	0.2	0.20	0.118	5.187
5	50	0.05	0.05	0.076	5.204
6	50	0.075	0.02	0.054	5.021
7	50	0.1	0.20	0.126	5.111
8	50	0.2	0.10	0.087	4.894
9	75	0.05	0.10	0.082	4.987
10	75	0.075	0.20	0.128	5.008
11	75	0.1	0.02	0.053	5.006
12	75	0.2	0.05	0.092	4.872
13	100	0.05	0.20	0.165	4.881
14	100	0.075	0,10	0.087	4.925
15	100	0.1	0,05	0.071	4.648
16	100	0.2	0,02	0.051	4.906

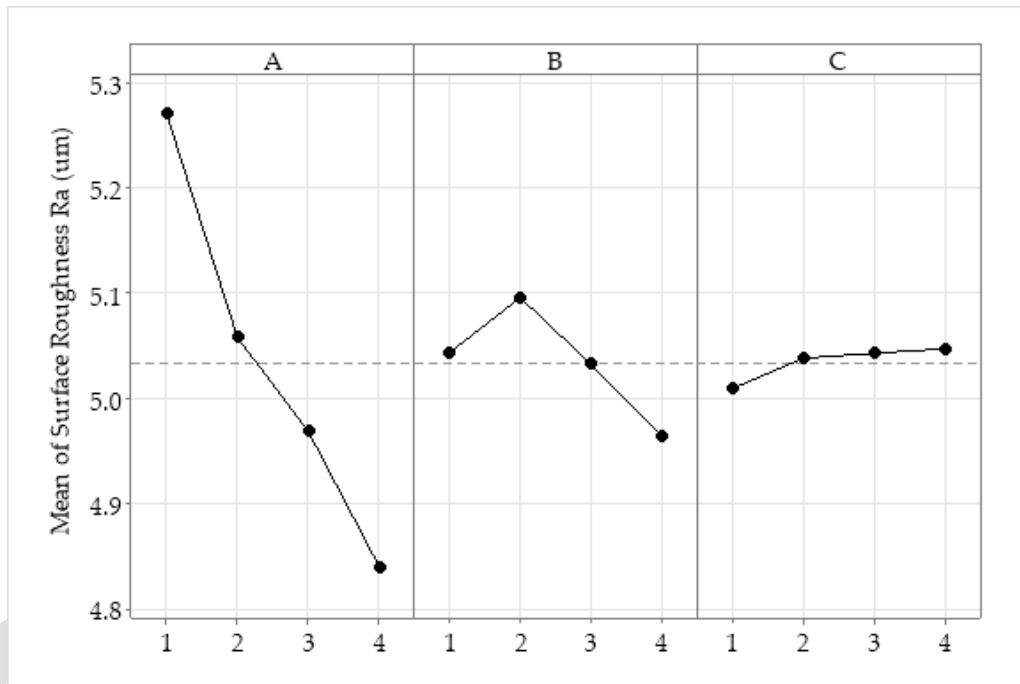


Рисунок 3.1 – Графік основного ефекту шорсткості поверхні (метод Тагучі, ортогональна матриця масиву).

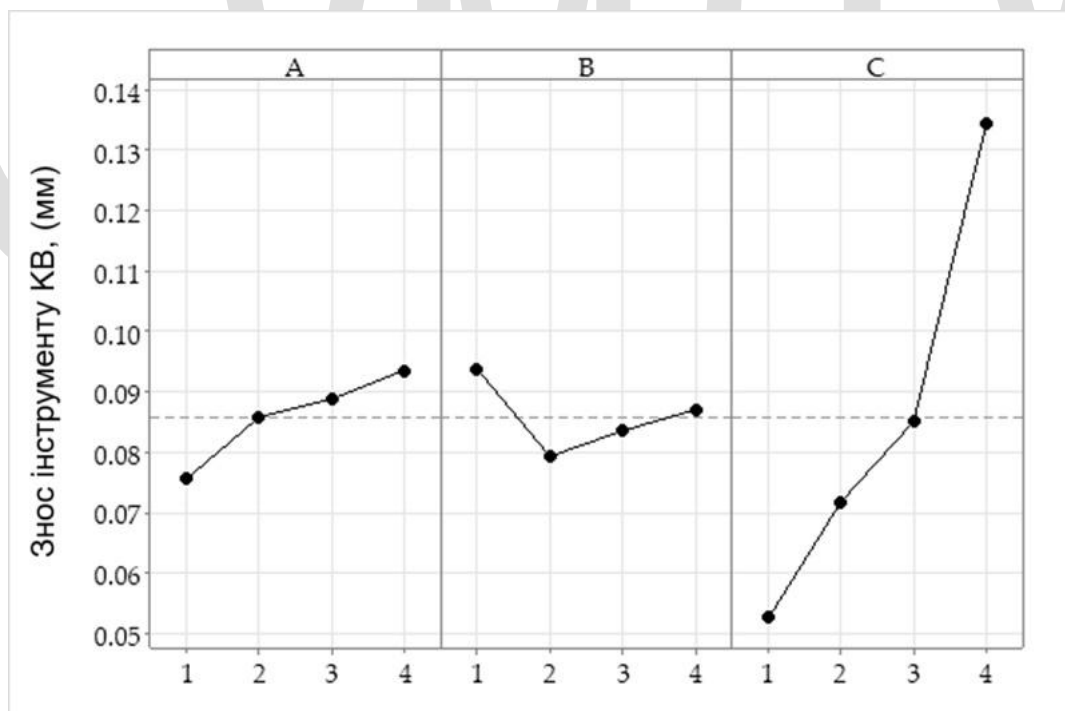


Рисунок 3.2 – Графік основного ефекту зносу інструменту КВ.

Результати вимірювання показують, що 4 рівні швидкості різання, 4 рівні переміщення та 1 рівень глибини різання є факторами для досягнення

найменшої шорсткості поверхні. Для визначених вихідних параметрів залежність є важливою, оскільки знос передньої поверхні відрізного диска впливає на відхилення діаметра як одного з параметрів якості обробленої поверхні. Дослідження цієї залежності та розробка оптимальних вхідних факторів є важливими також з точки зору використання лазерного триангуляційного датчика у вимірюванні параметрів якості.

Таким же чином, застосування вимірювання на стандартному тестовому зразку забезпечує передумови для використання отриманих даних у процесах, коли метод порівняння зі стандартом буде використовуватися рідко.

Найбільш істотний вплив вхідних факторів для КВ було виявлено в порядку глибини різання, переміщення та швидкості різання, як показано на рис. 3.6. Знос зменшується при зміні швидкості різання з 4 на 1 рівень і з 4 на 2 рівні подачі. Значний вплив на розмір КВ має глибина різання. Найменше значення зафіксовано при глибині різання 1 рівень. Під час переміщення вимірювали нижчі значення від 2 до 4 рівня. Найменше значення зносу зафіксовано при переміщенні 0.075 мм. Найнижче середнє значення КВ було виміряно при швидкості різання 25 м/хв, тобто 0.048 мм.

Вимірювання показали, що 1 рівень швидкості різання, 2 рівні переміщення та 1 рівень глибини різання є факторами для досягнення найменшого зносу передньої поверхні.

3.2 Мікроструктурний аналіз сталі 45 після точіння

Усі експерименти показали регулярне зношування передньої поверхні, тому аналізували вплив ширини кратера на Ra для сталі 45 (рис. 3.3).

Дефекти на обробленій поверхні, згідно рис. 3.4, були отримані за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primotech D/A ESD.

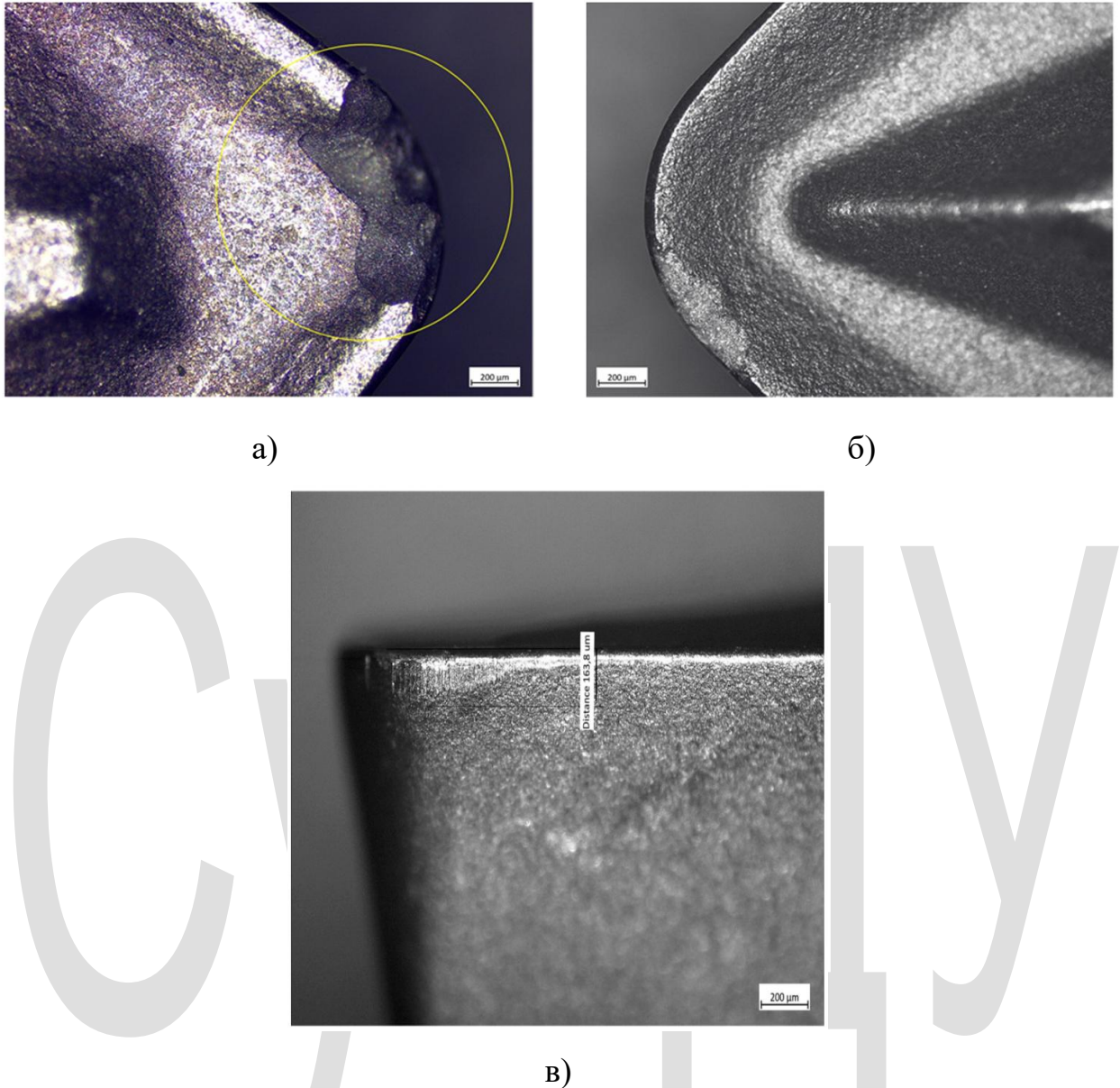


Рисунок 3.3 – Вимірювання зносу поверхні ріжучої пластини за допомогою мікроскопа Carl Zeiss Primotech D/A ESD: а) зовнішня поверхня інструменту, б) лицьова частини пошкодження інструменту, в) вимірний знос бокової сторони 163,8 мкм.

Під час точіння сталі 45 відбувається зміна мікрогеометрії поверхні через механічне деформування, що може призвести до наклепу — підвищення твердості та зміни структури на поверхні. Процес точіння також може викликати термічні зміни, які впливають на формування ферито-перлітних структур.

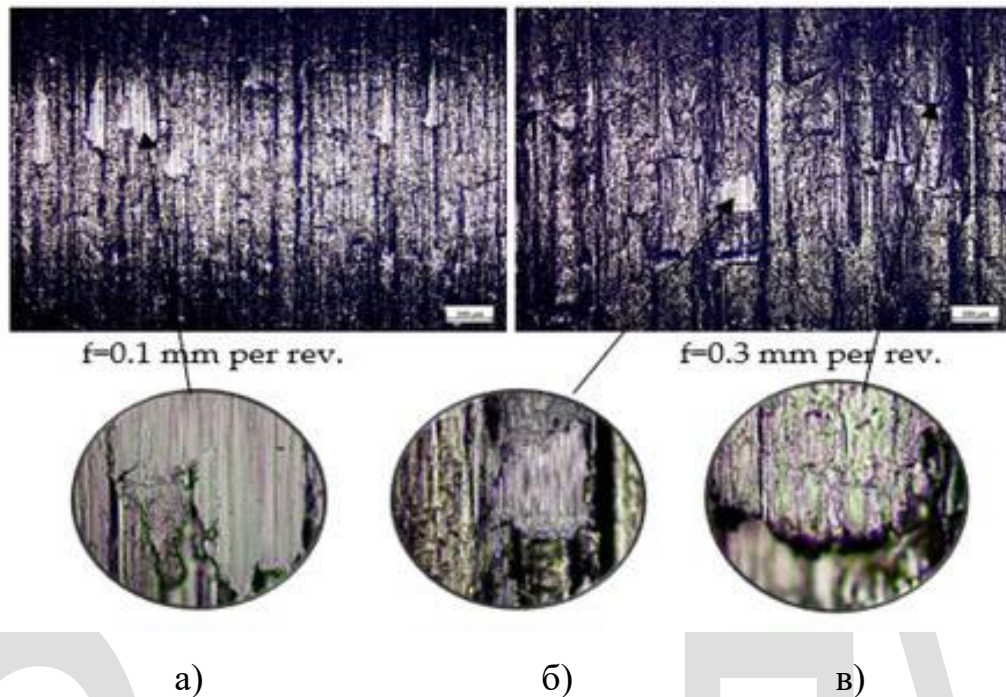


Рисунок 3.4 – Дефекти, які можуть виникати на обробленій поверхні після точіння сталі 45 при подачі (а) $f = 0,1$ мм/об., (б, в) $f = 0,3$ мм/об: а) розтікання матеріалу на обробленій поверхні, б) поверхня після руйнування елемента матеріалу, в) тріщина на обробленій поверхні.

Пластична деформація відбувалася в локалізованих місцях на обробленій поверхні, як показано на рис. 3.5. Ці спостереження були зафіксовані за допомогою скануючої електронної мікроскопії з автоемісійним соплом JEOL JSM 7000F.

Після точіння сталі 45 мікроструктура поверхні зазнає значних змін, які впливають на її механічні властивості та зносостійкість.

Під час точіння на поверхні сталі 45 виникає наклеп, що є результатом пластичної деформації. Це призводить до підвищення твердості поверхневого шару, але зменшує пластичність.

Збільшення швидкості точіння підвищує температуру в зоні різання, що може призвести до часткового загартування поверхневого шару. Висока температура сприяє змінам у структурі, включаючи можливе утворення мартенситу, якщо охолодження відбувається швидко.

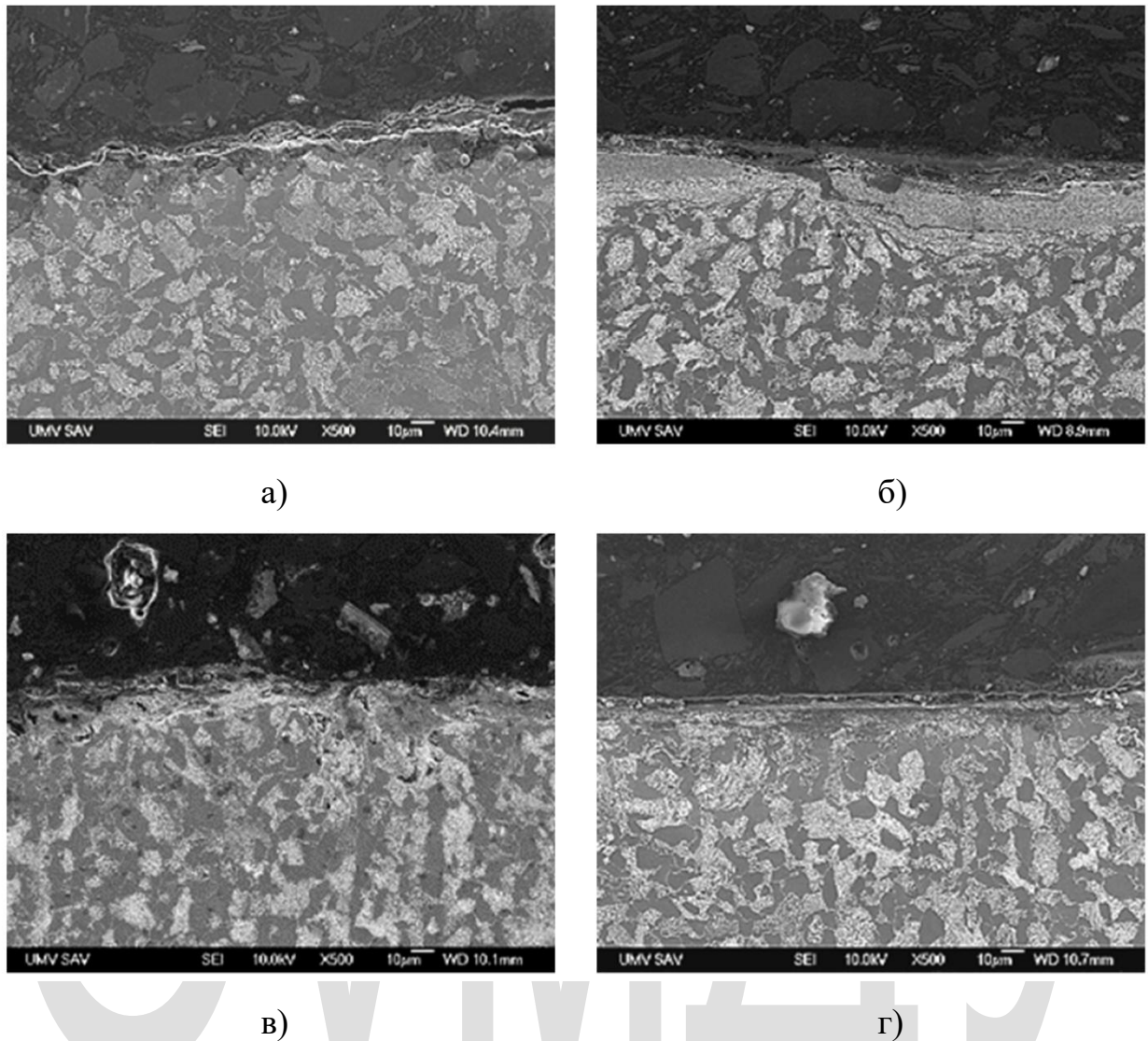


Рисунок 3.5 – Ферито-перлітні мікроструктури оброблених поверхонь після точіння сталі 45: а) деформація обробленої поверхні не піддається вимірюванню; б) локальна пластична деформація обробленої поверхні ~ 34 мкм; в) локальна пластична деформація обробленої поверхні, сліди об'ємного вилучення обробленої поверхні; г) локальна пластична деформація обробленої поверхні ~ 12 мкм.

Після обробки на поверхні можуть залишатися залишкові напруги, які впливають на довговічність деталі. Залежно від режимів обробки, ці напруги можуть бути як розтягуючими, так і стискаючими.

Точіння також впливає на мікрогеометрію поверхні, що характеризується шорсткістю. Вона визначається наявністю мікронерівностей, які можуть змінюватися в залежності від параметрів обробки (швидкість різання, подача тощо).

3.3 Математична оптимізація результатів вимірювання зносу і шорсткості

Експериментальні дані були нормовані для вихідних параметрів зносу передньої поверхні та шорсткості поверхні згідно з формулою 2.1 (табл. 3.2).

Сірі реляційні коефіцієнти були розраховані за допомогою формули 2.2 із нормалізованого набору даних у табл. 3.2. Для коефіцієнта розрізнення було обрано значення 0.5, оскільки вихідні параметри мають однакову вагу.

Встановлено, що чим менше значення зносу різальної частини інструменту, тим вища якість вихідних параметрів обробленої поверхні (табл. 3.2).

Сіру реляційну оцінку розраховували за допомогою формули 2.3 та відповідно до сірих реляційних коефіцієнтів.

Результати з табл. 3.2 використовуються для оптимізації коефіцієнта, якщо вони переведені в один градус. Вплив сірої реляційної оцінки для визначених умов експериментів показано на рис. 3.5.

Можемо визначити експеримент номер 4 для вхідних факторів A1-B4-C4 як вхідний експеримент.

Для розрахованих значень сірої реляційної оцінки вплив кожного фактору процесу на різних рівнях показано на рис. 3.6.

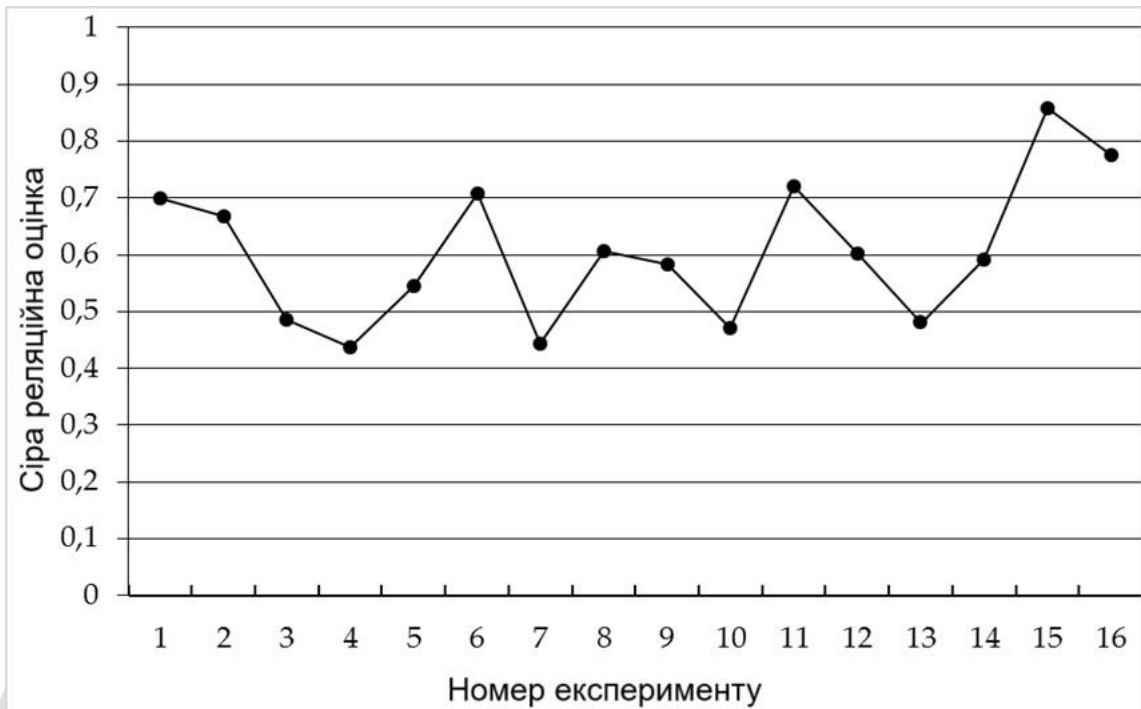


Рисунок 3.5 – Розподіл реляційних оцінок за вихідними параметрами зносу тильної поверхні ріжучого диска та шорсткості поверхні.

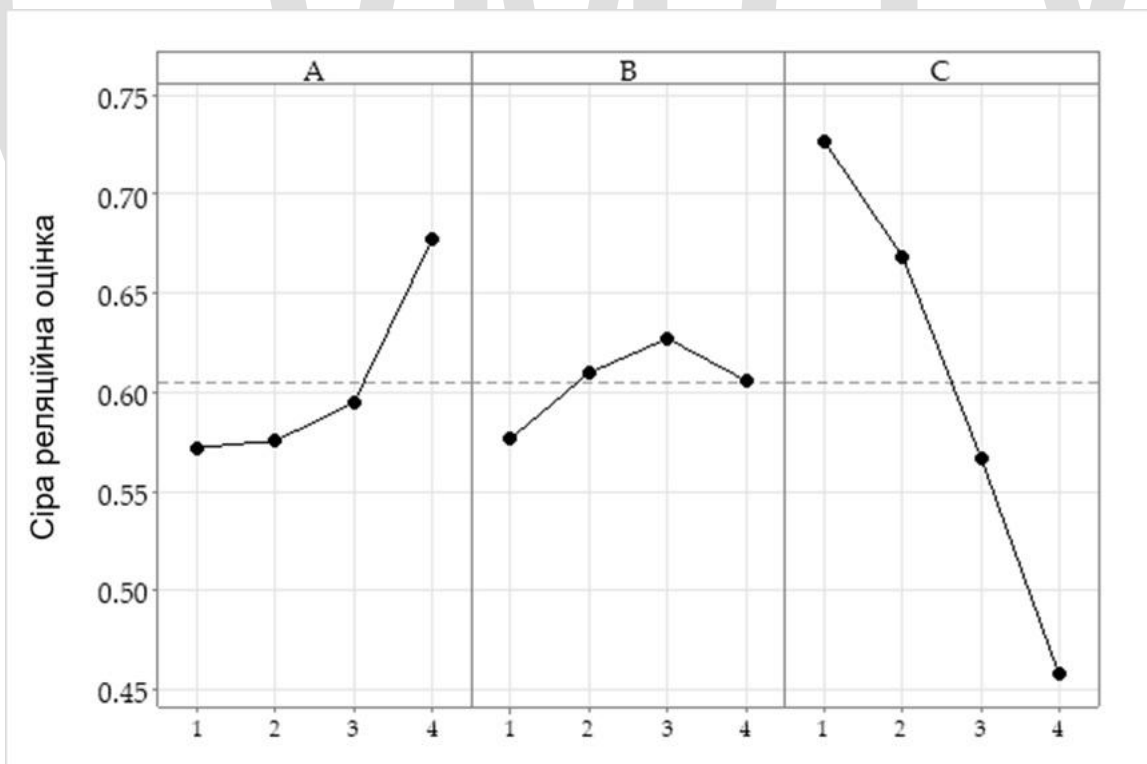


Рисунок 3.6 – Графік основних ефектів середньої сірої реляційної оцінки.

Таблиця 3.2 – Значення сірої реляції.

Експеримент	Значення сірої реляційної генерації		Послідовність відхилення		Сірий реляційний коефіцієнт		Сіра реляційна оцінка	Порядок
	V_{Bmax}	Ra	V_{Bmax}	Ra	V_{Bmax}	Ra		
Ідеальна послідовність	1	1	1	1	V_{Bmax}	Ra		
1	0.9658	0.4172	0.0342	0.5828	0.9360	0.4618	0.6989	5
2	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6667	6
3	0.6923	0.0809	0.3077	0.9191	0.6190	0.3523	0.4857	12
4	0.4017	0.3081	0.5983	0.6919	0.4553	0.4195	0.4374	16
5	0.7607	0.2863	0.2393	0.7137	0.6763	0.4120	0.5441	11
6	0.9487	0.5212	0.0513	0.4788	0.9070	0.5108	0.7089	4
7	0.3333	0.4056	0.6667	0.5944	0.4286	0.4569	0.4427	15
8	0.6667	0.6842	0.3333	0.3158	0.6000	0.6129	0.6065	7
9	0.7094	0.5648	0.2906	0.4352	0.6324	0.5347	0.5835	10
10	0.3162	0.5379	0.6838	0.4621	0.4224	0.5197	0.4710	14
11	0.9573	0.5404	0.0427	0.4596	0.9213	0.5211	0.7212	3
12	0.6239	0.7125	0.3761	0.2875	0.5707	0.6349	0.6028	8
13	0.0000	0.7009	1.0000	0.2991	0.3333	0.6257	0.4795	13
14	0.6667	0.6444	0.3333	0.3556	0.6000	0.5844	0.5922	9
15	0.8034	1.0000	0.1966	0.0000	0.7178	1.0000	0.8589	1
16	0.9744	0.6688	0.0256	0.3312	0.9512	0.6015	0.7764	2

Оптимальна комбінація вхідних даних вибирається на основі вищих середніх значень сірої реляційної оцінки згідно табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основний вплив на середню сіру реляційну оцінку.

Фактори	Середня сіра реляційна оцінка				Макс-Мін	Порядок
	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Рівень 4		
A	0.5722	0.5756	0.5946	0.6768	0.1046	2
B	0.5765	0.6097	0.6271	0.6058	0.0506	3
C	0.7263	0.6681	0.5671	0.4578	0.2687	1

Загальна середня сіра реляційна оцінка 0.6048.

Вище значення сірої реляційної оцінки виражає сильнішу кореляцію з еталонною послідовністю, тому оптимальним налаштуванням факторів для кількох вихідних параметрів є комбінація факторів A4-B3-C1, тобто швидкість різання 100 м/хв, подача 0.1 мм/об. і глибина різання 0.02 мм.

Вищі значення середньої сірої реляційної оцінки (рис. 4.2) виражають мінімальні значення зносу передньої поверхні ріжучої частини КВ і шорсткості поверхні Ra.

Таблиця 3.3 показує значення сірої реляційної оцінки як різницю між максимальними та мінімальними значеннями для чотирьох рівнів для окремих факторів. Результати можна інтерпретувати таким чином, що глибина різання (0.7263) має найбільш значний вплив на численні вихідні параметри (відповіді) порівняно зі швидкістю різання (0.6768) і подачею (0,6271) під час точіння сталі 45.

Важливість окремих вхідних факторів процесу для кількох вихідних параметрів можна перерахувати в порядку: глибина різання > швидкість різання > переміщення.

У табл. 3.4 сформульовано дисперсійний аналіз сірої реляційної оцінки. Це вказує на важливість факторів процесу для кількох вихідних параметрів (відповідей).

Таблиця 3.4 – Результати дисперсійного аналізу сірої реляційної оцінки.

Джерело	DF	Adj SS	Adj MS	F-значення	P-значення	Примітки
A	3	0.028805	0.009602	1.60	0.284	Незначний
B	3	0.005292	0.001764	0.29	0.828	Незначний
C	3	0.167440	0.055813	9.33	0.011	Значний
Помилка	6	0.035898	0.005983			
Загальне	15	0.237435				

Результати показали, що глибина різання є значущим фактором процесу, який впливає на численні вихідні параметри, оскільки її P-значення менше 0.05 на 95% рівні довіри. Для переміщення елемента та швидкості різання значення кількох параметрів одночасно не було продемонстровано.

3.4 Підтверджувальний експеримент

Наступним кроком є проведення підтверджувальних випробувань для визначення покращення сірої реляційної оцінки від початкового налаштування вхідних коефіцієнтів до оптимальних коефіцієнтів, отриманих під час точіння сталі 45 із вимірюванням обробленої площі за допомогою лазерного тріангуляційного датчика.

Для оптимального набору вхідних факторів A4-B3-C1 значення сірої реляційної оцінки становить 0.6451, що дуже близько до прогнозованого значення, тобто 0.6583. Щоб перевірити результат тесту, ми повторили експеримент для оптимального налаштування вхідних факторів A4-B3-C1.

Результати перевірного тесту були зроблені з повторюваністю 8 для оптимального рівня вхідних факторів, згідно з таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Підтверджувальний експеримент.

	Початкові параметри факторів	Оптимальні фактори різання	
		Прогнозування	Експеримент
Рівень	A1-B4-C4	A4-B3-C1	A4-B3-C1
KB (мм)	0.118		0.096
Ra (мм)	5.187		4.982
Сіра реляційна оцінка	0.4374	0.6583	0.6451
Покращення сірої реляційної оцінки = 0.2077			

Експеримент перевірки (табл. 3.5) виявив, що сіра реляційна оцінка для кількох вихідних параметрів, таких як знос тильної поверхні та відхилення діаметра, було значно покращено (на 0.2077) шляхом встановлення оптимальної комбінації параметрів. Ці результати підтверджують кінцеві вихідні параметри, шорсткість поверхні та поверхневий знос, виконані в робочих умовах на верстаті з ЧПК. З наведеного вище аналізу вхідні коефіцієнти для мінімальних значень зносу поверхні та шорсткості поверхні оптимізовано та досліджено при точінні сталі 45 методом сірого реляційного аналізу на основі процедури Тагучі.

3.5 Порівняння безконтактного та контактного методів вимірювання параметрів шорсткості

Далі було порівняно результат вимірювання шорсткості поверхні за допомогою лазерного триангуляційного датчика з результатами вимірювання на профілометрі MarSurf PS10 (табл. 3.6). Приклад показано на рис. 3.7.

Таблиця 3.6 показує, що для діапазону вхідних факторів отримані середні значення шорсткості поверхні R_a , виміряні на профілометрі MarSurf PS10, є більшими, ніж ті, що виміряні за допомогою безконтактного метода.

Таблиця 4.5 – Порівняння середніх результатів шорсткості поверхні R_a , виміряної за допомогою лазерного триангуляційного датчика і MarSurf PS10.

Номер експерименту	Швидкість різання А (м/хв)	Переміщення В (мм/об.)	Глибина різання С (мм)	MarSurf PS10 R_a (μm)	ЛТД R_a (μm)
	Фактори процесу			Експериментальні результати	
1	25	0.05	0.02	5.324	5.102
2	25	0.075	0.05	5.684	5.427
3	25	0.1	0.10	5.562	5.364
4	25	0.2	0.20	5.782	5.187
5	50	0.05	0.05	5,687	5.204
6	50	0.075	0.02	5.578	5.021
7	50	0.1	0.20	5.369	5.111
8	50	0.2	0.10	5.210	4.894
9	75	0.05	0.10	5.214	4.987
10	75	0.075	0.20	5.842	5.008
11	75	0.1	0.02	5.629	5.006
12	75	0.2	0.05	5.187	4.872
13	100	0.05	0.20	5.326	4.881
14	100	0.075	0.10	5.628	4.925
15	100	0.1	0.05	5.026	4.648
16	100	0.2	0.02	5.247	4.906

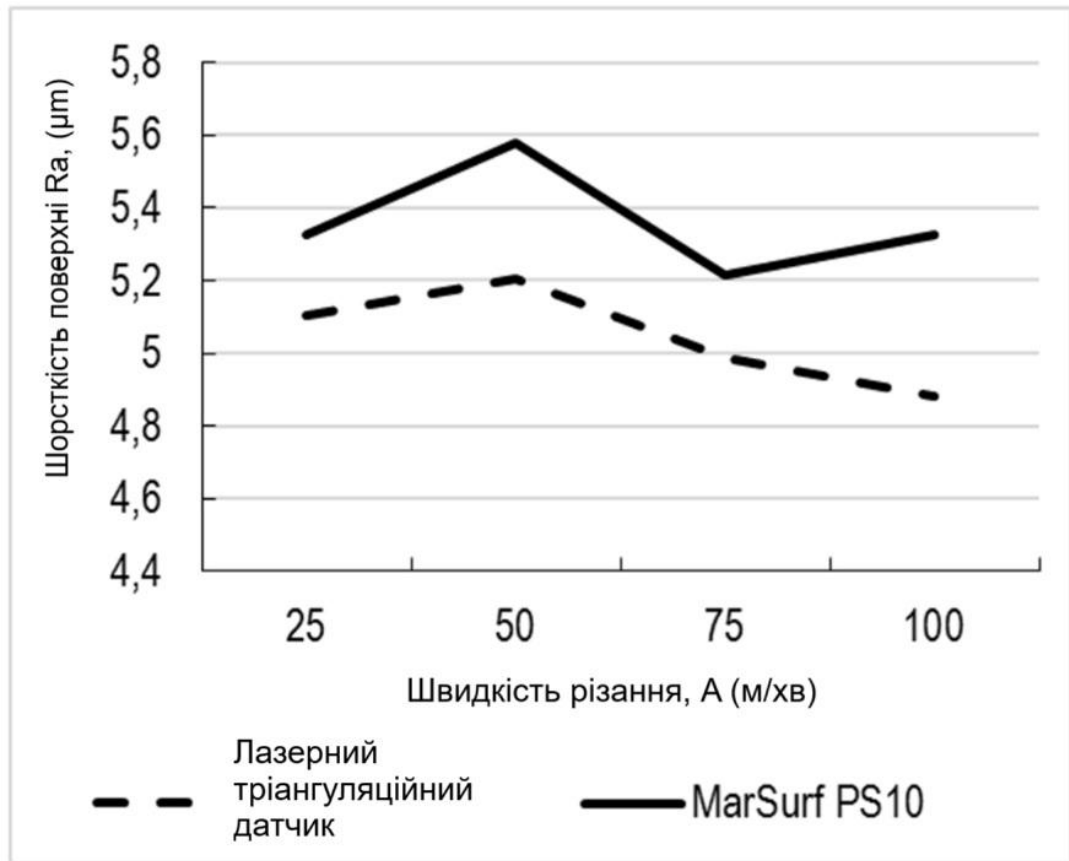


Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості поверхні від швидкості різання при подачі 0.05 мм.

Таким чином, проведені експерименти показали можливість реалізації безконтактних вимірювальних датчиків. Сучасні тенденції диктують використання інтелектуальних датчиків і пристроїв, які безперервно надсилають відповідні дані негайно в інформаційну систему підприємств, що дозволяє підвищити якість продукції та технічний стан виробничих машин.

Висновки до розділу 3

1. Аналіз даних показав, що знос передньої поверхні інструменту поступово зростає зі зростанням значень параметрів швидкості різання, переміщення та глибини різання. Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання. Найменше середнє значення шорсткості поверхні було виміряно при швидкості різання 100 м/хв і становило 4.648 мкм.

2. Після точіння сталі 45 мікроструктура поверхні зазнає значних змін, які впливають на її механічні властивості та зносостійкість. Ці зміни можуть значно поліпшити або погіршити експлуатаційні характеристики матеріалу, тому важливо контролювати параметри обробки для досягнення бажаних властивостей.

3. Вище значення сірої реляційної оцінки виражає сильнішу кореляцію з еталонною послідовністю, тому оптимальним налаштуванням факторів для кількох вихідних параметрів є комбінація факторів A4-B3-C1, тобто швидкість різання 100 м/хв, подача 0.1 мм/об. і глибина різання 0.02 мм.

4. Глибина різання (0.7263) має найбільш значний вплив на численні вихідні параметри (відповіді) порівняно зі швидкістю різання (0.6768) і подачею (0,6271) під час точіння сталі 45.

5. Для діапазону вхідних факторів отримані середні значення шорсткості поверхні Ra, виміряні на профілометрі MarSurf PS10, є більшими, ніж ті, що виміряні за допомогою лазерного триангуляційного датчика.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Вимірювання шорсткості поверхні є критично важливим для контролю якості в багатьох галузях, включаючи машинобудування, авіацію та електроніку.

Визначення економічної ефективності при вимірюванні шорсткості поверхні є важливим аспектом в технологічному процесі обробки деталей. Економічна ефективність оцінюється через співвідношення між витратами на обробку та отриманими результатами, що включає якість обробленої поверхні та її вплив на експлуатаційні характеристики виробу.

Вибір оптимальних параметрів шорсткості має враховувати технологічні можливості та специфіку виробництва для досягнення максимальної ефективності. Основні аспекти оцінки економічної ефективності підсумовані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні аспекти оцінки економічної ефективності.

Фактори	Характеристика
Витрати на обробку	Включають витрати на матеріали, енергію, заробітну плату працівників та амортизацію обладнання. Зниження шорсткості може вимагати додаткових витрат на механічну обробку, наприклад, шліфування, що підвищує вартість
Якість поверхні	Висока якість шорсткості (менша шорсткість) може призвести до покращення технічних характеристик виробу, таких як зносостійкість, корозійна стійкість і тертя.

Продовження табл. 4.1

Фактори	Характеристика
	Це може зменшити витрати на обслуговування та продовжити термін служби виробів.
Технологічні можливості	Вибір параметрів шорсткості повинен враховувати технологічні можливості різних методів обробки. Наприклад, для грубо оброблених поверхонь можуть бути достатніми більші значення шорсткості, що знижує витрати на обробку.
Аналіз співвідношення витрат і вигоди	Необхідно провести аналіз співвідношення між витратами на досягнення певного рівня шорсткості та вигодами від покращення експлуатаційних характеристик. Це може включати аналіз зменшення частоти ремонту або заміни деталей.

Існують два основні підходи до вимірювання шорсткості: контактні та безконтактні методи. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, що впливають на їх економічну ефективність (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Порівняння економічної ефективності.

Параметр	Контактні методи	Безконтактні методи
Точність	Висока	Залежить від умов (може бути нижчою)
Швидкість вимірювання	Низька	Висока
Вартість обладнання	Зазвичай нижча	Зазвичай вища
Пошкодження поверхні	Можливе	Немає

Продовження табл. 4.2

Параметр	Контактні методи	Безконтактні методи
Складність вимірювань	Обмежена (складні форми)	Ширші можливості

Таким чином, безконтактні методи вимірювання шорсткості демонструють вищу економічну ефективність у виробничих умовах завдяки швидкості, точності та відсутності ризику пошкодження деталей. Однак вибір методу залежить від специфіки завдання, типу матеріалів та умов експлуатації. Для підприємств, які прагнуть до підвищення продуктивності та якості продукції, безконтактні технології можуть стати оптимальним рішенням.

Висновки до розділу 4

При оцінці економічної ефективності шорсткості поверхні важливо враховувати декілька ключових параметрів, які впливають на експлуатаційні характеристики виробів і, відповідно, на їх вартість.

Економічна ефективність оцінюється через співвідношення між витратами на обробку та отриманими результатами, що включає якість обробленої поверхні та її вплив на експлуатаційні характеристики виробу.

Існують два основні підходи до вимірювання шорсткості: контактні та безконтактні методи. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, що впливають на їх економічну ефективність.

Визначено, що безконтактні методи вимірювання шорсткості демонструють вищу економічну ефективність у виробничих умовах завдяки швидкості, точності та відсутності ризику пошкодження деталей. Однак вибір методу залежить від специфіки завдання, типу матеріалів та умов експлуатації. Для підприємств, які прагнуть до підвищення продуктивності та якості продукції, безконтактні технології можуть стати оптимальним рішенням.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Обробка металів, зокрема точіння, є важливим процесом у промисловості, але вона супроводжується різноманітними ризиками для здоров'я та безпеки працівників.

В Україні існують чіткі правила і вимоги щодо охорони праці та техніки безпеки, які регулюють ці процеси, затверджені НПАОП 0.00-1.68-13. Правила охорони праці під час холодного оброблення металів (наказ від 16.10.2013 р. № 749 «Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів») [30].

Правила встановлюють вимоги з охорони праці під час холодного оброблення металів, а саме:

- оброблення металів різанням (точіння, фрезерування, свердління, стругання);
- згинання, волочіння, пресування металів;
- холодне штампування металів;
- шліфування металів.

5.1 Загальні вимоги до технологічних процесів

Згідно НПАОП 0.00-1.68-13. Правила охорони праці під час холодного оброблення металів (наказ від 16.10.2013 р. № 749 «Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів») [30]:

«Роботодавець повинен забезпечити організацію і проведення робіт згідно з вимогами ГОСТ 12.3.002-75 «ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности».

Роботодавець забезпечує виконання вимог Технічного регламенту безпеки машин, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 30 січня 2013 року № 62, ГОСТ 12.2.003-91 «ССБТ. Оборудование

производственное. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.009-80 «ССБТ. Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.109-89 «ССБТ. Штампы для листовой штамповки. Общие требования безопасности», ДСТУ ГОСТ 12.2.113:2007 «Преси кривошипні. Вимоги щодо безпеки» (ГОСТ 12.2.113-2006, IDT), ГОСТ 12.2.114-86 «ССБТ. Прессы винтовые. Требования безопасности», ДСТУ ГОСТ 12.2.116:2007 «Машини листозгинальні три- та чотиривалкові. Вимоги щодо безпеки», ДСТУ ГОСТ 12.2.118:2007 «Ножиці. Вимоги щодо безпеки» (ГОСТ 12.2.118-2006, IDT), ДСТУ 3738-98 (ГОСТ 12.2.072-98) «Роботи промислові. Роботизовані технологічні комплекси. Вимоги безпеки та методи випробувань», ГОСТ 12.2.119-88 «ССБТ. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Общие требования безопасности», ДСТУ 7234:2011 «Дизайн і ергономіка. Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки», ГОСТ 12.2.062-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Ограждения защитные», ГОСТ 12.2.064-81 «ССБТ. Органы управления производственным оборудованием. Общие требования безопасности».

Пристосування, застосовувані під час холодного оброблення металів, повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.2.029-88 «ССБТ. Приспособления станочные. Требования безопасности».

Температура зовнішніх поверхонь основного та допоміжного устаткувань повинна відповідати вимогам ДСТУ EN 563-2001 «Безпечність машин. Температури поверхонь, доступних до дотику. Ергономічні дані для встановлення граничних значень температури гарячих поверхонь» (EN 563:1994, IDT).

Пневматичні і гідравлічні системи устаткування повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.2.040-79 «ССБТ. Гидроприводы объемные и системы смазочные. Общие требования безопасности конструкции», ГОСТ 12.2.086-83 «ССБТ. Гидроприводы объемные и системы смазочные. Общие требования

безопасности к монтажу, испытаниям и эксплуатации», ГОСТ 12.2.101-84 «ССБТ. Пневмоприводы. Общие требования безопасности к конструкции».

Завантаження, розвантаження, транспортування вихідних матеріалів, готової продукції повинні виконуватися з дотриманням вимог ГОСТ 12.3.020-80 «ССБТ. Процессы перемещения грузов на предприятиях. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.022-80 «ССБТ. Конвейеры. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.3.009-76 «ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности», Правил будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 18 червня 2007 року № 132, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 09 липня 2007 року за № 784/14051 (НПАОП 0.00-1.03-07), та ГОСТ 12.3.010-82 «ССБТ. Тара производственная. Требования безопасности при эксплуатации».

Працівники під час виконання робіт з холодного оброблення металів повинні дотримуватися вимог Інструкції з охорони праці під час виконання монтажних робіт інструментами і пристроями, затвердженої наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 05 червня 2001 року № 254, зареєстрованої в Міністерстві юстиції України 20 липня 2001 року за № 616/5807.

Установлення і знімання заготовок з матеріалів, що мають виражені токсичні властивості (берилій, магнієві сплави), необхідно виконувати із застосуванням автоматичних маніпуляторів або роботів промислових.

Під час оброблення дрібних деталей повинні застосовуватися механічні пристрої (бункери, механічні руки). Верхні краї бункерів автоматів під час завантаження в них заготовок вручну повинні знаходитися не вище 1300 мм від рівня підлоги. При розташуванні країв бункерів на більшій висоті повинні передбачатися стаціонарні підставки або майданчики.

Зберігання і транспортування мастильно-охолоджувальних рідин повинні відповідати вимогам ДСТУ 4454:2005 «Нафта і нафтопродукти. Маркування, пакування, транспортування та зберігання».

Приготування мастильно-охолоджувальних рідин необхідно виконувати централізовано в окремому приміщенні, обладнаному витяжною вентиляцією.

Очищення мастильно-охолоджувальних рідин від механічних домішок необхідно виконувати із застосуванням пристроїв (фільтри, магніти) для уловлювання дрібної стружки, абразиву, пилу та іншого бруду.

Для збирання мастильно-охолоджувальних рідин та запобігання розливу їх на підлогу необхідно застосовувати піддони.

Видалення стружки з поверхонь верстатів вручну необхідно виконувати на зупиненому устаткуванні за допомогою щіток і гачків у захисних окулярах згідно з вимогами ГОСТ 12.4.013-85 «ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия».

5.2 Вимоги до охорони праці під час оброблення металів різанням

Згідно НПАОП 0.00-1.68-13. Правила охорони праці під час холодного оброблення металів (наказ від 16.10.2013 р. № 749 «Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів» [30]:

«Оброблення заготовок діаметром до 630 мм включно на універсальних верстатах токарної групи необхідно виконувати із застосуванням захисного огороження зони оброблення. З протилежного робочому місцю боку зона оброблення повинна мати екран.

Під час установа і знімання заготовок на універсальних токарних і токарно-револьверних верстатах огороження їх затискних патронів повинні легко відводитися та не обмежувати технологічні можливості верстатів.

В універсальних токарних, токарно-револьверних і карусельних верстатах час гальмування шпинделя після його вимикання при всіх частотах обертання не повинен перевищувати: у токарних верстатах для оброблення

деталей діаметром до 500 мм - 5 секунд; у токарних верстатах для оброблення деталей діаметром до 630 мм - 10 секунд; у карусельних верстатах для оброблення деталей діаметром до 1000 мм - 10 секунд. Для токарних і карусельних верстатів, призначених для оброблення більших за розмірами деталей, час гальмування не встановлюється.

Під час виконання робіт на токарних верстатах з механізованим переміщенням пінолі задньої бабки необхідно застосовувати пристрій (планшайбу) для регулювання і контролю осьового зусилля притискання центра пінолі до заготовки. У токарно-карусельних верстатах планшайба повинна мати огороження, яке не перешкоджає обслуговуванню верстата.

Оброблювані заготовки (прутки) на пруткових токарних автоматах і пруткових револьверних верстатах повинні мати огороження по всій довжині, обладнане шумопоглинальним пристроєм.

У разі застосування огороження у вигляді напрямних труб, що обертаються разом із заготовкою (прутком) або коли заготовка (пруток) із задньої сторони виступає за межі огороження, прутковий магазин повинен мати кругове огороження по всій довжині.

Під час оброблення довгомірних заготовок (прутків) на універсальних верстатах пруток повинен обгороджуватися захисним пристроєм з боку заднього кінця шпинделя.

Під час точіння деталей (валів, осей) довжиною понад дванадцять діаметрів, а також під час швидкісного або силового точіння деталей довжиною понад вісім діаметрів необхідно застосовувати додаткові опори (люнети).

Різальний інструмент необхідно встановлювати з мінімальним вильотом. Для установаження різального інструмента по висоті необхідно використовувати набір підкладок різної товщини, довжина і ширина яких повинні бути не меншими опорної частини різця. Закріплення різця повинно здійснюватися не менше ніж двома болтами по всій площині різця.

Під час оброблення ламких матеріалів і при утворенні дрібної сталеної стружки необхідно використовувати пристрої для видалення стружки.

Під час свердління отворів у деталях необхідно використовувати стаціонарні або ручні затискні пристосування (затискні пристрої, упори, напрямні елементи, кондуктори). Не дозволяється утримувати деталь руками.

Пристосування (кондуктори) для свердління та оброблення отворів діаметром до 6 мм, які не закріплені стаціонарно, повинні мати рукоятки, скоби для утримання їх рукою. Для уникнення повороту пристосування або відривання його від столу необхідно застосовувати упори, притискні пристрої.

Оброблення заготовок діаметром до 1250 мм на верстатах зубооброблювальної групи необхідно виконувати із захистом зони оброблення пристроями з оглядовими вікнами з органічного скла.

По закінченні циклу оброблення заготовки на верстатах зупинка інструмента повинна відбуватися протягом інтервалів часу, але не більше:

6 секунд - для зубофрезерних і зубодовбальних верстатів, призначених для оброблення деталей діаметром до 1000 мм;

10 секунд - для зубофрезерних і зубодовбальних верстатів, призначених для оброблення деталей діаметром понад 1000 мм;

5 секунд - для зубошевінгувальних, зубохонінгувальних і зубонакатних верстатів;

30 секунд - для зубошліфувальних верстатів, що працюють з конусним, профільним абразивними кругами;

40 секунд - для зубошліфувальних верстатів, що працюють з черв'ячним кругом.

Нарізання конічних зубчастих коліс із круговим зубом необхідно виконувати на верстатах з блокуванням включення руху інструмента від електропривода при користуванні ручним приводом інструмента під час вивірення різців зуборізної головки.

Оброблення конічних коліс із круговим зубом діаметром 500 мм і більше необхідно виконувати із застосуванням захоплювального пристрою (ременем з буртами) з міцного матеріалу (брезенту), оснащеного рукоятками для захоплення підймальним пристроєм.

Під час різання металів неробоча ділянка пилки відрізного круглопилкового верстата повинна бути огорожена. Відрізні круглопилкові верстати повинні з передньої сторони оснащуватися відкидним убік або знімним захисним екраном.

Не дозволяється використовувати пильні диски з діаметром отвору, що перевищує діаметр вала (шпинделя), а також застосовувати вставні кільця (втулки) для зменшення діаметра отвору.

Відрізані заготовки необхідно передавати в тару за допомогою конвеєрів, жолобів.

Подавання матеріалу під час його розрізання стрічковими або дисковими пилками необхідно виконувати за допомогою спеціальних пристосувань, що забезпечують стійке положення матеріалу.

Під час роботи верстата не дозволяється стояти в площині обертання дискової пилки або абразивного відрізного круга, виштовхувати стружку із сегментів диска під час його обертання, а також підтримувати кінець заготовки, що відрізається.

Для охолодження зони різання під час оброблення виробів з магнію необхідно застосовувати мастильно-охолоджувальні рідини на основі мінеральних і рослинних масел, що не містять кислот і води.

Стружку і пил магнієвих сплавів необхідно зберігати в закритій металевій тарі.»

5.3 Заходи щодо охорони навколишнього середовища

Токарна обробка є важливим процесом у металообробній промисловості, але вона також може мати негативний вплив на навколишнє середовище. Для

мінімізації цього впливу необхідно впроваджувати різноманітні заходи з охорони довкілля [31].

Використання екологічно чистих матеріалів.

- Вибір матеріалів: використання матеріалів, що мають менший екологічний слід, може зменшити забруднення. Наприклад, вибір деревини з сертифікованих лісів або перероблених матеріалів.

- Зменшення відходів: оптимізація технологічних процесів для зменшення кількості відходів, які утворюються під час обробки.

Контроль викидів забруднюючих речовин.

- Фільтрація викидів: встановлення систем очищення повітря для зменшення викидів шкідливих часток і газів у атмосферу.

- Моніторинг якості повітря: регулярний контроль за якістю повітря на виробництві для виявлення і усунення джерел забруднення.

Управління відходами.

- Системи збору та утилізації відходів: впровадження ефективних систем збору стружки, масла та інших відходів для їх подальшої переробки або утилізації.

- Зменшення небезпечних відходів: використання менш небезпечних хімікатів у технологічних процесах, що дозволяє знизити ризик забруднення.

Енергозбереження та ефективність.

- Використання енергоефективного обладнання: інвестиції в сучасні верстати та технології, які споживають менше енергії.

- Оптимізація виробничих процесів: застосування методик, які дозволяють зменшити енергетичні витрати під час токарної обробки.

Навчання та підвищення обізнаності працівників.

- Тренінги з охорони праці: проведення навчань для працівників щодо екологічних аспектів їхньої діяльності та безпечних методів роботи.

- Пропаганда екологічної свідомості: заохочення працівників до дотримання екологічних норм і правил на робочому місці.

Дотримання законодавства.

- Відповідність екологічним стандартам: забезпечення відповідності всіх виробничих процесів чинному екологічному законодавству та стандартам охорони праці.

- Регулярні перевірки та аудит: проведення регулярних перевірок для оцінки дотримання екологічних норм на підприємстві.

СумДДУ

Висновки до розділу 5

При точінні металів важливо дотримуватись ряду вимог охорони праці, щоб забезпечити безпеку працівників та запобігти нещасним випадкам.

Основні вимоги включають:

1. Кваліфікація працівників – працівники повинні проходити навчання з техніки безпеки та інструктажі перед початком роботи на верстатах.

2. Безпечне обладнання – всі верстати повинні мати надійні захисні огороження, які запобігають доступу до рухомих частин і захищають від відлітаючої стружки; регулярна перевірка і обслуговування верстатів для виявлення несправностей, які можуть призвести до травм.

3. Організація робочого місця – робоче місце повинно бути чистим і впорядкованим, щоб уникнути травм через падіння або спотикання; забезпечення достатнього освітлення робочої зони для запобігання перенапруження зору.

4. Використання засобів індивідуального захисту – працівники повинні носити спеціальний одяг, що не має вільних частин, які можуть застрягти в механізмах; обов'язкове використання захисних окулярів та рукавичок під час роботи.

5. Техніка безпеки під час роботи – заготовки повинні бути надійно закріплені на верстатах, щоб уникнути їх викидання під час обробки; оператори повинні бути уважними та не відволікатися під час роботи, дотримуючись усіх правил безпеки.

6. Вимоги до охорони довкілля – правильна утилізація стружки та інших відходів виробництва для запобігання забрудненню довкілля.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідження якості поверхні сталі 45 після точіння шляхом мікроструктурного аналізу матеріалу, визначення параметрів поверхневого зносу і шорсткості поверхні та їх оптимізації.

На підставі проведеного комплексного дослідження зроблено наступні висновки:

1. Аналіз даних показав, що знос передньої поверхні інструменту поступово зростає зі зростанням значень параметрів швидкості різання, переміщення та глибини різання. Найбільш істотний вплив вхідних факторів було виявлено в наступному порядку: швидкість різання, переміщення і глибина різання. Найменше середнє значення шорсткості поверхні було виміряно при швидкості різання 100 м/хв і становило 4.648 мкм.

2. Після точіння сталі 45 мікроструктура поверхні зазнає значних змін, які впливають на її механічні властивості та зносостійкість. Ці зміни можуть значно поліпшити або погіршити експлуатаційні характеристики матеріалу, тому важливо контролювати параметри обробки для досягнення бажаних властивостей.

3. Вище значення сірої реляційної оцінки виражає сильнішу кореляцію з еталонною послідовністю, тому оптимальним налаштуванням факторів для кількох вихідних параметрів є комбінація факторів A4-B3-C1, тобто швидкість різання 100 м/хв, подача 0.1 мм/об. і глибина різання 0.02 мм.

4. Глибина різання (0.7263) має найбільш значний вплив на численні вихідні параметри (відповіді) порівняно зі швидкістю різання (0.6768) і подачею (0,6271) під час точіння сталі 45.

5. Для діапазону вхідних факторів отримані середні значення шорсткості поверхні R_a , виміряні на профілометрі MarSurf PS10, є більшими, ніж ті, що виміряні за допомогою лазерного триангуляційного датчика.

6. Безконтактні методи вимірювання шорсткості демонструють вищу економічну ефективність у виробничих умовах завдяки швидкості, точності та відсутності ризику пошкодження деталей.

7. При точінні металів важливо дотримуватись ряду вимог охорони праці, щоб забезпечити безпеку працівників та запобігти нещасним випадкам.

СуммДДУ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Альховик О.В. Сучасні методи та засоби контролю мікрогеометричних параметрів поверхонь деталей і виробів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки 32(71), 3 (2021). <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/06>
2. Satbayeva, Z.A., Bayatanova, L.B., Kozhanova, R.S.: Research of Electrolyte Plasma Treatment Impact on Wear Resistance and Roughness of 18HN3MA-SH Steel. MSF 989, 793–8 (2020). DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.989.793.
3. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT). 3 поправками
4. Ivchenko, O., Ivanov, V., Trojanowska, J., Zhyhylii, D., Ciszak, O., Zaloha, O., Pavlenko, I., Hladyshch, D.: Method for an Effective Selection of Tools and Cutting Conditions during Precise Turning of Non-Alloy Quality Steel C45. Materials 15, 505 (2022). DOI: 10.3390/ma15020505.
5. Shvets, S.V., Machado, J.: Numerical model of cutting tool blade wear. Journal of Engineering Sciences 8(2), A1–A5 (2021). DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).a1.
6. Pavlenko, I., Trojanowska, J., Gusak, O., Ivanov, V., Pitel, J., Pavlenko, V.: Estimation of the Reliability of Automatic Axial-balancing Devices for Multistage Centrifugal Pumps. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 63(1), 52–56 (2019). DOI: 10.3311/PPme.12801.
7. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Dobrovolska, L., Popov, V., Mounif, A.S.Y.: Creation of a Superhydrophilic Surface with Anti-icing Properties for X18H10T Stainless Steel Using a Nanosecond Laser. In: Cioboată, D.D. (eds.) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022.

ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 534, pp. 172–184. Springer, Cham (2023). DOI: 10.1007/978-3-031-15944-2_17.

8. Hovorun, T., Khaniukov, K., Varakin, V., Pererva, V., Vorobiov, S., Burlaka, A., Khvostenko, R.: Improvement of the physical and mechanical properties of the cutting tool by applying wear-resistant coatings based on Ti, Al, Si, and N. *Journal of Engineering Sciences* 8(2), C13–C23 (2021). DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).c3.

9. Wu, X., Li, C., Zhou, Z., et al.: Circulating purification of cutting fluid: an overview. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 2565–2600 (2021). DOI: 10.1007/s00170-021-07854-1.

10. Butler, D.: Surface Roughness Measurement. In: Li, D. (eds) *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, pp. 1945–1949. Springer, Boston, MA (2008). DOI: 10.1007/978-0-387-48998-8_1506.

11. Vukelic, D., Prica, M., Ivanov, V., Jovicic, G., Budak, I., Luzanin, O.: Optimization of Surface Roughness based on Turning Parameters and Insert Geometry. *Int j simul model* 21(3), 417–428 (2022). DOI: 10.2507/IJSIMM21-3-607.

12. Hwang, Y.K., Lee, C.M.: Surface roughness and cutting force prediction in MQL and wet turning process of AISI 1045 using design of experiments. *J Mech Sci Technol* 24, 1669–1677 (2010). DOI: 10.1007/s12206-010-0522-1.

13. Esteves Correia, A., Paulo Davim, J.: Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. *Measurement* 44(5), 1000–1005 (2011). DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.018.

14. Wang, Y., Xie, F., Ma, S., Dong, L.: Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. *Optics and Lasers in Engineering* 93, 164–170 (2017). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2017.02.004.

15. Valíček, J., Držík, M., Hryniewicz, T., Harničárová, M., Rokosz, K., Kušnerová, M., Barčová, K., Bražina, D.: Non-contact method for surface roughness

measurement after machining. *Measurement Science Review* 12(5), 184–188 (2012). DOI: 10.2478/v10048-012-0028-3.

16. Aulbach, L., Salazar Bloise, F., Lu, M., Koch, A.W.: Non-Contact Surface Roughness Measurement by Implementation of a Spatial Light Modulator. *Sensors* 17, 596 (2017). DOI: 10.3390/s17030596P.

17. Patil, S.H., Kulkarni, R.: Surface roughness measurement based on singular value decomposition of objective speckle pattern. *Optics and Lasers in Engineering* 150, 106847 (2022). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106847.

18. Mital, G., Dobránský, J., Ružbarský, J., Olejárová, Š.: Application of Laser Profilometry to Evaluation of the Surface of the Workpiece Machined by Abrasive Waterjet Technology. *Appl. Sci.* 9, 2134 (2019). DOI: 10.3390/app9102134.

19. Korzeniewska, E., Sekulska-Nalewajko, J., Gocławski, J., Rosik, R., Szczesny, A., Starowicz, Z.: Surface Morphology Analysis of Metallic Structures Formed on Flexible Textile Composite Substrates. *Sensors* 20, 2128 (2020). DOI: 10.3390/s20072128.

20. Шорнікова, С. В. (2022). Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (5), 13-20. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.2>

21. Neslušán, M., Mrkvica, I., Čep, R., Kozak, D., Konderla, R. Deformation After Heat Treatment and Their Influence on Cutting Process. *Tehnicki vjesnik/Technical Gazette*, 18(4), 601-608 (2011), ISSN 1330-3651.

22. Mrkvica, I., Konderla, R., Faktor, M. Turning of Inconel 718 by Cemented Carbides. In MORGAN, M.M., SHAW, A., MGALOBILISHVILI, O. *Precision Machining VI. Key Engineering Materials*, 496, 138-147, (2012). ISSN 1013-9826, ISBN 978-3-03785-297-2.

23. Peterka, J., Pokorný, P. Václav, Š. CAM strategies and surfaces accuracy. In *Annals of DAAAM and Proceedings of DAAAM Symposium, Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium "Intelligent*

Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", 22-25th October 2008, Trnava, Slovakia, 19(1), 1061–1062 (2008). ISSN 1726-9679.

24. Leško, I., Flegner, P., Pandula, B., Horovčák, P. New principles of process control in geotechnics by acoustic methods. In: *Metalurgija*. 46 (3), 165–168, (2007), ISSN 0543-5846.

25. Jurko, J.; Miškov-Pavlík, M.; Hladký, V.; Lazorík, P.; Michalík, P.; Petruška, I. Measurement of the Machined Surface Diameter by a Laser Triangulation Sensor and Optimization of Turning Conditions Based on the Diameter Deviation and Tool Wear by GRA and ANOVA. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5266, <https://doi.org/10.3390/app12105266>.

26. ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools. 2nd edn. (1993).

27. Deng, J.: Control problems of grey systems. *Syst. Control. Lett.* 1, 288–294 (1982). DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X.

28. Lin, C.L.: Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics. *Materials and Manufacturing Processes* 19(2), 209–220 (2004). DOI: 10.1081/AMP-120029852.

29. Jurko, J., Iakovets, A., Berladir, K. (2023). Comparison of Surface Roughness Measured by Contact and Noncontact Methods. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice . EAI ARTEP 2023*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_3

30. Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1871-13#Text>

31. Технології верстатних робіт: підручник / [Гоменюк Д. В., Романов Л. А., Шимановський М. М.]. – Житомир, "Полісся", 2021. – 492 с.