

**Міністерство освіти і науки України**  
**Луцький національний технічний університет**  
**Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій**  
**Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**  
**ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ**  
**ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ПЕРЕРИВЧАСТОМУ ШЛІФУВАННІ**  
**MEASURING COMPLEX FOR TEMPERATURE**  
**RESEARCH DURING INTERMITTENT GRINDING**

спеціальність 176 Мікро- та наносистемна техніка  
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи МНТм-21  
МЕРЕЖА Андрій Сергійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент  
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
ЛАПЧЕНКО Юрій Сергійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** комп'ютерних та інформаційних технологій

**Кафедра:** автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**Ступінь вищої освіти:** магістр

**Галузь знань:** 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

**Спеціальність:** 176 Мікро- та наносистемна техніка

**Освітня програма:** «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., проф. О. ПОВСТЯНОЙ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мережі Андрію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Вимірювальний комплекс дослідження температури при переривчастому шліфуванні

керівник роботи: к.т.н., доцент Пташенчук Віталій Віталійович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «27» червня 2025 р. № 304/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: «03» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Сталь ШХ15, діапазон вимірювання температури 0-1000 °С

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз задачі, яка буде вирішуватись в рамках дослідження температури при переривчастому шліфуванні кілець підшипників. Огляд інформаційних джерел в галузі дослідження температури при переривчастому шліфуванні підшипникової сталі. Пошук шляхів реалізації завдання по дослідженні температури переривчастого шліфування. Огляд методів дослідження температури при шліфуванні. Характеристика переривчастого шліфування металів та його особливості. Характеристика перетворювачів температури термоциклічного характеру її зміни. Розробка вимірювальної системи дослідження температури при переривчастому шліфуванні. Дослідження температури при переривчастому шліфуванні. Балансування та правка різального інструменту. Методика керування температурою різання в ході обробки матеріалу.

5. Перелік графічного матеріалу: Презентація кваліфікаційної роботи на 10 слайдах.

## 6. Консультант и розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз вихідних даних та шляхи вирішення поставленого завдання	Пташенчук В. В.		
Теоретична частина	Пташенчук В. В.		
Експериментально-розрахункова частина	Пташенчук В. В.		
Спеціальна частина	Пташенчук В. В.		
Нормоконтроль	Лапченко Ю. С.		
Гарант ОП	Лапченко Ю. С.		
Показник запозичень тексту	<b>2,29 %</b>		
Академічна доброчесність	Федік Л. Ю.		

7. Дата видачі завдання «26» червня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Провести огляд інформаційних джерел за тематикою кваліфікаційної роботи	до 10 вересня 2025 р.	
2	Провести аналіз загальної проблеми та вибір напрямків досліджень	до 20 вересня 2025 р.	
3	Описати теоретичну складову об'єкту дослідження	до 10 жовтня 2025 р.	
4	Провести розробку вимірювального комплексу	до 10 листопада 2025 р.	
5	Провести експериментальні дослідження температури	до 20 листопада 2025 р.	
6	Нормоконтроль	до 01 грудня 2025 р.	
7	Інструментальна перевірка і експертне оцінювання рівня унікальності тексту	до 02 грудня 2025 р.	
8	Подати чистовий варіант кваліфікаційної роботи магістра на кафедрі	до 03 грудня 2025 р.	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Мережа А. С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)Керівник роботи \_\_\_\_\_ Пташенчук В. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Мережа А. С. Вимірювальний комплекс дослідження температури при переривчастому шліфуванні. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Мікро- та наносистемна техніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Кваліфікаційна робота описує особливості та механізми дослідження температури при переривчастому шліфуванні залізовуглецевих конструкційних матеріалів. Розглянуті теоретичні аспекти вибору раціональних параметрів перетворювача температури при її термоциклічному характері зміни та представлення її експериментальних результатів за допомогою вимірювального комплексу.

Отримані експериментальні результати термоциклічного аналізу поверхневого шару залізовуглецевої підшипникової сталі дають можливість відтворити і проаналізувати повний характер зміни температури при переривчастому шліфуванні залізовуглецевих матеріалів та забезпечити покращення експлуатаційних характеристик їх поверхневого шару.

Ключові слова: сталь, температура, перетворювач, комплекс, вимірювання, переривчасте шліфування.

## ANNOTATION

Network A. Formation and research of the microgeometry of the ends of the bearing rings. Manuscript.

Master's qualification work in the educational program «Micro- and nanosystem technology». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

The master's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of used sources and appendices

The master's thesis describes the features and mechanisms of temperature research during intermittent grinding of iron-carbon structural materials. The theoretical aspects of choosing rational parameters of a temperature converter with its thermocyclic nature of change and the presentation of its experimental results using a measuring complex are considered.

The obtained experimental results of thermocyclic analysis of the surface layer of iron-carbon bearing steel make it possible to reproduce and analyze the full nature of temperature changes during intermittent grinding of iron-carbon materials and ensure improvement of the operational characteristics of their surface layer.

Key words: steel, temperature, converter, complex, measurement, intermittent grinding.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ</b>	
1.1 Аналіз задачі, яка буде вирішуватись в рамках дослідження температури при переривчастому шліфуванні .....	11
1.2 Огляд інформаційних джерел в галузі дослідження температури переривчастого шліфування.....	12
1.3 Пошук шляхів реалізації завдання по дослідженню температури переривчастого шліфування.....	21
1.4 Постановка завдань до кваліфікаційної роботи .....	21
Висновки до розділу .....	22
<b>РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА</b>	
2.1 Аналіз методів дослідження температури при шліфуванні .....	23
2.2 Моделювання теплових процесів переривчастого шліфування.....	25
2.3 Розробка вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні.....	33
Висновки до розділу .....	38
<b>РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА</b>	
3.1 Опис експериментальної установки .....	40
3.2 Планування та проведення експериментальних досліджень температури переривчастого шліфування.....	44
Висновки до розділу .....	48
<b>РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА</b>	
4.1 Балансування та правка різального інструменту шліфувальних верстатів.....	49
4.2 Методика управління теплонапруженістю процесу абразивного оброблення .....	56
Висновки до розділу .....	59

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	64
ДОДАТКИ .....	67

## ВСТУП

Актуальність теми. Значення температурних вимірювань у сучасній техніці є надзвичайно значною, що проявляється у великій кількості таких вимірювань в різних галузях, зокрема в машинобудуванні, приладобудуванні, верстатобудуванні, космічній та інших галузях. Використання металевих конструкційних матеріалів високої точності в усіх наведених галузях забезпечується фінішними операціями обробки, які супроводжуються високими контактними температурами при їх обробці та впливають на експлуатаційні та надійнісні параметри виробу і технічної системи в цілому. Температурні вимірювання являються основою для вивчення енергетичних та міцнісних характеристик технічних систем, оптимізації ефективності їх роботи та надійності в ході експлуатації. Експлуатація складних технічних систем, які мають рухомі елементи та піддаються впливу різного роду динамічних навантажень залежить від якості поверхневого шару матеріалу на який значний вплив має температура в ході його оброблення. Температура є невід'ємним ключовим фактором, який має безпосередній вплив на властивості матеріалу, може їх змінювати як в кращу так і в гіршу сторону. Надто висока температура може призвести до припиків, тріщин та викришування поверхневого шару, низька призводить до заниження режимних параметрів та зменшення ефективності процесу маханообробки та виробництва в цілому. Високі некритичні значення температури є корисними, дозволяють покращувати твердість за рахунок гартування матеріалу а при необхідності досягати необхідної пластичності за рахунок відпуску металевих залізвуглецевих сплавів.

Проблема дослідження. Вплив температури на поверхневий шару при термоциклічному характері її зміни має позитивний ефект на якість та експлуатаційні характеристики виробів. Однак, забезпечення необхідного рівня якості поверхневого шару матеріалу при переривчастому шліфуванні можливе при цілеспрямованому та контрольованому впливу температури на оброблювану поверхню та залишається актуальним питанням у зв'язку з термоциклічним

характером зміни температури та складністю її визначення, пов'язаною з низькою чутливістю датчиків температури та досить швидкою зміною теплонапруженості процесу переривчастого шліфування.

Мета роботи – дослідження контактних температур процесу переривчастого шліфування залізовуглецевих сплавів.

Об'єкт дослідження – циклічна температура поверхневого шару залізовуглецевих матеріалів при переривчастому шліфуванні та її параметри.

Предмет дослідження – взаємозв'язок температури з параметрами процесу переривчастого шліфування.

Методи дослідження. В ході виконання роботи були застосовані основні положення технології машинобудування та різання металів, планування та проведення експериментальних досліджень, математичний апарат для опису процесів та явищ, обробки результатів досліджень. Для дослідження температури використано термоелектричний давач типу хромель-алюмель.

Завдання дослідження.

1. Провести аналіз існуючих методів вимірювання температури при термоциклічному характері її зміни.

2. Провести моделювання температури різання процесу переривчастого абразивного оброблення.

3. Провести розробку вимірювального комплексу дослідження температури переривчастого шліфування.

4. Провести дослідження контактних температур процесу переривчастого абразивного оброблення.

5. Описати аспекти правки та балансування різального інструменту та їх вплив на точність та надійність процесу абразивного оброблення.

Теоретична значущість.

Розроблена вимірювальна система дослідження та контролю температури різання металів при абразивній обробці.

Практична цінність та галузь застосування.

1. Розроблено вимірювальний комплекс дослідження контактних температур при переривчастому шліфуванні.

2. Проведено дослідження контактних температур процесу переривчастого шліфування та встановлено їх зв'язок з режимними параметрами процесу механообробки.

Наукова новизна роботи. Наведена інженерна методика та алгоритм бездефектного оброблення залізобуглецевих сплавів шляхом контролю теплонапруженості процесу різання за режимними параметрами.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра.

Мережа А. С., Пташенчук В. В. Система багатоточкового вимірювання температури при шліфуванні. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». м. Луцьк, грудень 2025 р. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 133-138.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ

#### 1.1 Аналіз задачі, яка буде вирішуватись в рамках дослідження температури при переривчастому шліфуванні

Задача дослідження температури процесу переривчастого шліфування включає в себе дослідження факторів, які мають вплив на теплонапруженість процесу обробки, таких як швидкість різання, подача матеріалу, тип абразиву, конструкція різального інструменту та властивості матеріалу заготовки. Важливе місце при дослідженні температури переривчастого шліфування має характер зміни температури під впливом конструктивних параметрів різального інструменту та її вплив на властивості оброблюваного матеріалу. Температура в зоні контакту переривчастого абразивного інструменту та досліджуваної заготовки являється визначальним параметром, який характеризує якість новоутвореної поверхні, зношення інструменту та ефективності процесу загалом [1]. Для аналізу температури різання переривчастим інструментом повинні застосовуватися сучасні моделі та методи її вимірювання, враховуючи нестабільний та динамічний характер процесу термоциклічного оброблення переривчастими різальними інструментами.

Рішення задачі визначення температури переривчастого шліфування можливе наступними методами дослідження:

- використання тепловізорів для безпосереднього вимірювання температури на поверхні досліджуваної заготовки;
- використання експериментальних методів, які дають можливість змінювати параметри режимів абразивного оброблення та фіксувати контактні температура та характер їх змін;
- розробка та використання теоретичних моделей теплоутворення та розповсюдження тепла в процесі переривчастого шліфування, які враховують нестационарний характер такого процесу.

## 1.2 Огляд інформаційних джерел в галузі дослідження температури переривчастого шліфування

Переривчасте шліфування є сучасним та прогресивним методом обробки металевих конструкційних матеріалів, особливо важкооброблюваних [2, 3]. На даний момент теоретично обгрунтовано ефективність застосування такого методу, який проявляється в зменшенні теплонапруженості процесу різання, стабілізації якості поверхневого шару та можливості інтенсифікації режимних параметрів, що дає змогу підвищити ефективність процесу обробки. Складність застосування переривчастого абразивного оброблення вимагає застосування спеціального складнопрофільного різального інструменту (рис. 1.1) з подальшим балансуванням в ході використання, що значно ускладнює процес його практичного застосування.

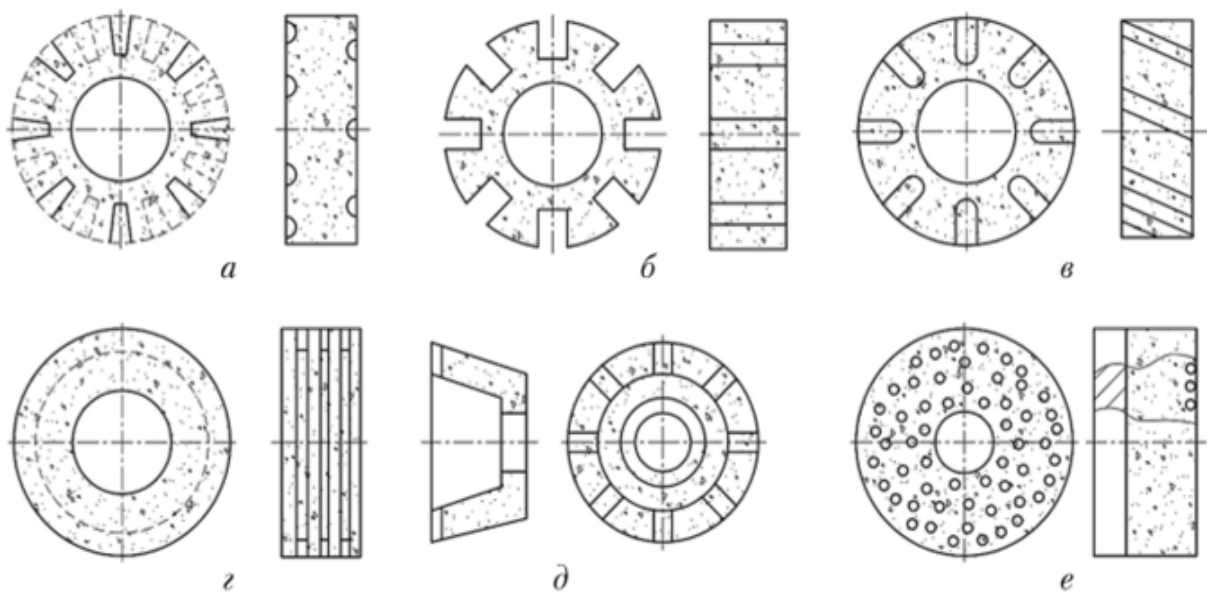


Рисунок 1.1 – Конструкція переривчастого абразивного інструменту [3]:

а – круг з виточками; б – круг з пазами; в – круг з прорізами;

г – круг з канавками; д – круг з насічками; е – круг з отворами

Окрім того, теоретичні моделі не дають достовірної картини характеру зміни температури при термоциклічному характері процесу абразивного оброблення та вимагають проведення експериментальних досліджень для

отримання повної та достовірної картини зміни температури, її зв'язок з режимними параметрами та якісними параметрами поверхні оброблюваного матеріалу.

Дослідження температури з використанням експериментальних методів є найбільш достовірним способом визначення температури в зоні різання, який дає змогу встановити реальні значення температури, що важко при теоретичних методах дослідження, які не дають змогу врахувати всі фактори впливу через надмірне спрощення реальності під час побудови моделей, відсутності адекватних емпіричних даних для перевірки, а також через суб'єктивні похибки в логічних висновках. Типова крива температури переривчастого шліфування має циклічний характер (рис. 1.2) з ділянками зростання та спадання температури.

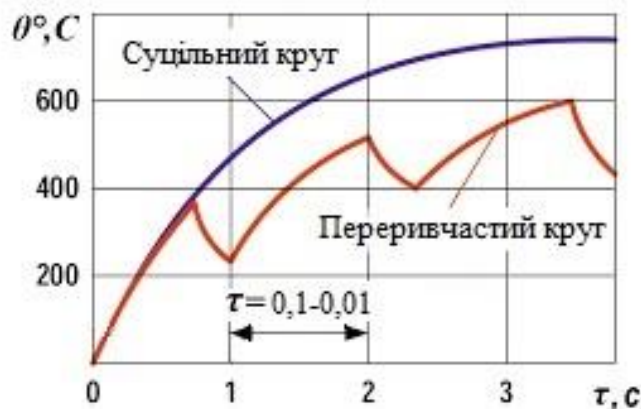


Рисунок 1.2 – Характер зміни температури при абразивному обробленні [4]

Експериментальні дослідження температури при переривчастому абразивному обробленні мають складності, які проявляються у закритості зони дослідження та термоциклічному характері її зміни, що унеможливорює застосування більшості існуючих засобів вимірювання температури через неспроможність реалізації процесу вимірювання та недостатніх метрологічних характеристик вимірювальних пристроїв, зокрема чутливості термоперетворювачів. Вимірювання температури матеріалу при переривчастому шліфуванні можливе контактними методами з використанням надчутливих

термоелектричних та терморезистивних датчиків температури та потребує побудови вимірювальної системи на їх основі з подальшим вимірюванням температури та обґрунтуванням режимів дискретного шліфування.

Важливість дослідження температури переривчастого абразивного оброблення полягає в ефективності цього процесу, який залежить від геометричних параметрів переривчастого абразивного інструменту. Окрім уникнення припиків та дефектів поверхні оброблюваного матеріалу переривчаста абразивна обробка дає можливість підвищити твердість поверхневого шару за рахунок гартування термоциклічним впливом. Температура переривчастого шліфування є головним критерієм його ефективності та може бути забезпечена за рахунок раціонально-підібраних геометричних параметрів різального інструменту з урахуванням режимних параметрів процесу різання.

Проблема дослідження температури при переривчастому абразивному обробленні конструкційних металевих матеріалів полягає в складності вимірювання миттєвих контактних температур за рахунок короткочасності та нестационарності термоциклічного процесу, при якому контактні ділянки постійно змінюються. Це пов'язане з тим, що при такому виді абразивного оброблення тепловий потік не є постійним а дискретним (переривчастим), за рахунок якого створюються сприятливі умови на поверхні матеріалу (знижується тепловий потік та контактні температури, зникають припики та перегрів матеріалу). Однак, дискретність теплового режиму призводить до труднощів точного визначення температурних полів на поверхні оброблюваної деталі та є актуальною проблемою процесу переривчастого шліфування, без вирішення якої неможливе ефективне та повноцінне його застосування з використанням усіх його переваг над традиційними методами абразивного оброблення.

До основних аспектів, які ускладнюють дослідження переривчастого шліфування можна віднести:

– непостійність теплового потоку. На відміну від суцільного абразивного оброблення матеріалу, яке характеризується відносно постійним тепловий

поток при переривчастому шліфуванні він постійно та суттєво змінюється за рахунок циклічного характеру контакту різального інструменту з поверхнею заготовки.

– швидка зміна контактних зон. За рахунок переривчастого характеру дії різального інструменту на заготовку, контактні ділянки на її поверхні постійно змінюються, що ускладнює їх точне вимірювання.

– вплив інших факторів. На температуру в зоні різання впливає ряд інших факторів, таких як швидкість обертання абразивного інструменту, швидкість подачі заготовки, зернистість абразиву, тип оброблюваного матеріалу, застосування змашувально-охолоджувальної рідини, що робить задачу більш комплексною та складнішою для рішення моделюванням через складність врахування усіх наявних факторів та достовірності їх опису і врахування.

Непостійність теплового потоку при переривчастому шліфуванні а також малопрогнозована кількість джерел тепла у вигляді контактів абразивних зерен з поверхнею матеріалу в сукупності з іншими впливовими факторами не дають можливості стверджувати у достовірності пропонованих математичних моделей в сфері температурного моніторингу процесу переривчастого абразивного оброблення та вимагають проведення експериментальних досліджень у цій й температури процесу переривчастого шліфування присвячено ряд наукових праць, які математично описують температурні поля при дискретному впливі абразивного інструменту на оброблювану поверхню матеріалу та їх взаємозв'язок з геометричними параметрами різального інструменту.

У науковій статті під назвою «Визначення температури шліфування при імпульсному тепловому потоці» представників одеської школи шліфування професора Ларшина В. П. та його учениці доцента Ліщенко Н. В. були отримані розрахункові формули для знаходження температури шліфування від впливу поверхні імпульсного нестационарного теплового потоку для будь-якої частоти його дії. Змінюючи частоту теплового впливу в теоретичній моделі можна переходити від макро – до мікропереривчастості, відповідно, для шліфувального

круга з нарізаними на поверхні пазами і звичайного круга з дискретними джерелами тепла – зернами [5].

Для вирішення задачі вибору оптимальних геометричних параметрів переривчастих шліфувальних кругів (числа ріжучих виступів  $N$ , коефіцієнта заповнення  $S$  їх періоду) за цими формулами визначені максимальні поверхневі температури переривчастого шліфування в залежності від кількості виступів  $N$  на переривчастому абразивному інструменті та коефіцієнта заповнення  $S$  їхнього періоду. Для виявлення закономірностей імпульсної дії теплового потоку з різною частотою його дії число  $N$  ріжучих виступів на абразивному різальному інструменті діаметром 390 мм змінювали від 3 до 350 (на практиці стосовно звичайних макропереривчастих кіл  $N \leq 35$ ). Розрахунки авторами було зроблено для трьох різних значень коефіцієнта заповнення, який виражений за формулою (1.1) та склав 0,2; 0,5 та 0,8 відповідно [5].

$$S = T_1/T, \quad (1.1)$$

де  $T_1$  – час впливу ріжучого виступу абразивного інструменту, с;

$T$  – час впливу ріжучого виступу та період повторення цих впливів, с.

Умовою сумісності отриманих даних є забезпечення сталості середньої щільності теплового потоку на інтервалі макро та мікроциклу шліфування, тобто  $q_{ave} = \text{const} = 22,856 \text{ Вт/мм}^2$  (рис. 1.3).

З наведеної графічної залежності видно, що поверхнева температура шліфування матеріалу від числа  $N$  ріжучих виступів абразивного круга, отримана при кожному фіксованому значенні  $S$  є нелінійною. Температура різко зменшується на початковому інтервалі зміни  $N$  (на ділянці  $N \leq 80$ ). Зменшення параметра  $S$  від  $S=0,8$  (крива А) до  $S=0,2$  (крива С) призводить до збільшення максимальної температури у всьому інтервалі зміни кількості ріжучих виступів  $N$ .

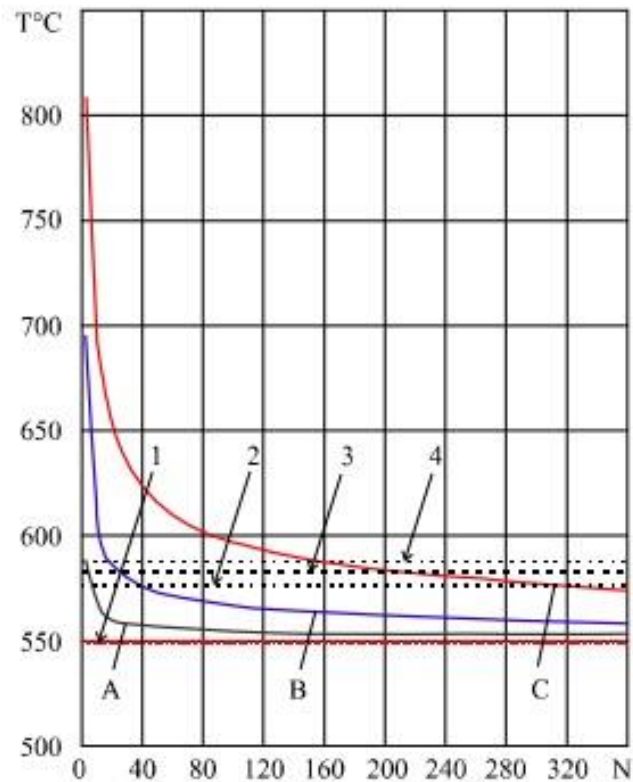


Рисунок 1.3 – Значення температури ( $T, ^\circ\text{C}$ ) при переривчастому шліфуванні при  $q_{\text{ave}}=\text{const}=22,856 \text{ Вт/мм}^2$  в залежності від числа ріжучих виступів  $N$  абразивного різального інструменту при різному значенні коефіцієнта заповнення  $S$ : А; В та С –  $S=0,8; 0,5$  та  $0,2$  [5]

У зазначеному діапазоні зміни  $S$  найменша температура має місце при  $S=0,8$ . Видно, що найменші значення  $N$  мають місце при  $S=0,8$  послідовності, побудованої у порядку зростання мінімальних рівнів поверхневих температур. Зі збільшенням  $S$  від  $0,2$  до  $0,8$  при тому самому мінімальному рівні температур рекомендовані значення  $N$  зменшуються. Фактично число  $N$  характеризує дискретні джерела тепла – зерна шліфувального круга (віртуальні «виступи»). Моделювання дискретності теплового процесу переривчастого шліфування авторами проведено з частотою впливу окремих зерен абразивного круга, кількість яких визначити важко через хаотичність їх розміщення в зв'язці різального інструменту та через різнорозмірність самих зерен, що знижує достовірність отриманих результатів.

Температуру в зоні шліфування можна регулювати, якщо шліфування проводити з певними багаторазовими на часовому інтервалі  $0 \leq \tau \leq \tau_n$  перервами. Це дозволяє змінити характер температурного поля та його величину у зоні шліфування. Відомі рішення для визначення температури, яка встановилася, коли поверхня нагрівається імпульсним тепловим потоком з певним періодом, що містить ділянки нагрівання та охолодження [5].

Математична модель переривчастого шліфування для визначення температури від пульсуючого теплового потоку [5] дозволяє визначати цю температуру в будь-який момент часу на інтервалі часу значень температур. Недоліком такої моделі є невизначеність цього часового інтервалу (рис. 1.4), який настає після закінчення перехідного процесу встановлення температури, що обмежує застосування моделі для проектування оптимальних конструкцій переривчастих шліфувальних кругів.

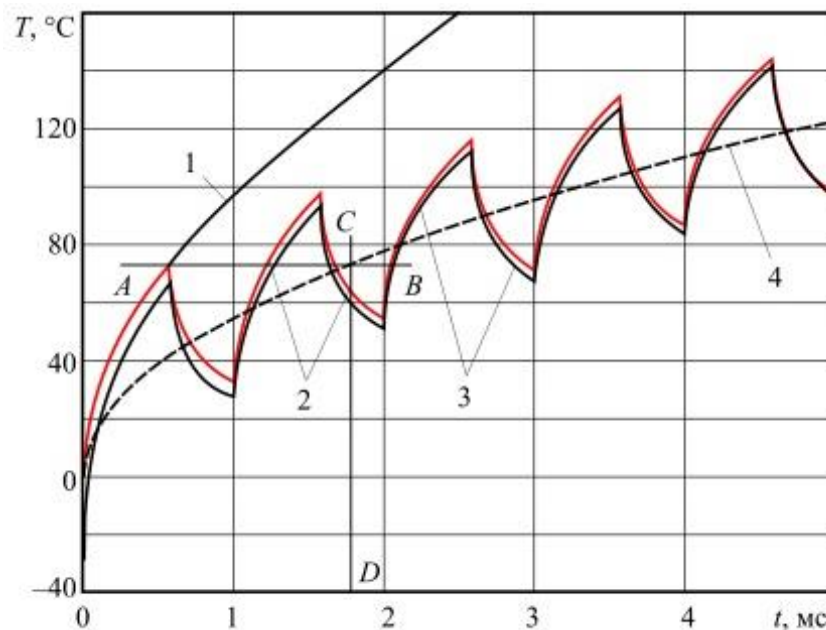


Рисунок 1.4 – Залежність температури шліфування від часу нагріву [5]:

- 1 – від впливу постійної густини теплового потоку  $q_{\max}=40 \text{ Вт/мм}^2$ ;
- 2 – отримана методом суперпозиції [5]; 3 – сумарна температура по моделі [5]; 4 – неперервно зростаюча температура

Нестационарний тепловий режим процесу переривчастого абразивного шліфування, який супроводжується періодичним перериванням контакту абразивного круга з оброблюваною деталлю, відкриває принципово нові можливості керування теплонапруженістю процесу обробки та якістю поверхневого шару матеріалу. Якщо тривалість процесу абразивної обробки зробити меншим за час теплового насичення за рахунок зміни довжини ріжучих виступів переривчастого абразивного круга, то температура в зоні контакту круга з оброблюваною деталлю не досягатиме своїх максимальних значень і може бути значно знижена [6].

На рисунку 1.5 представлений характер зміни температури від часу дії теплового джерела. За період проходження ріжучого виступу  $\tau_1$  оброблювана поверхня нагрівається до температури  $\Theta_2$ , а за час переривання процесу  $\tau_2$  температура поверхні знижується до  $\Theta_1$ .

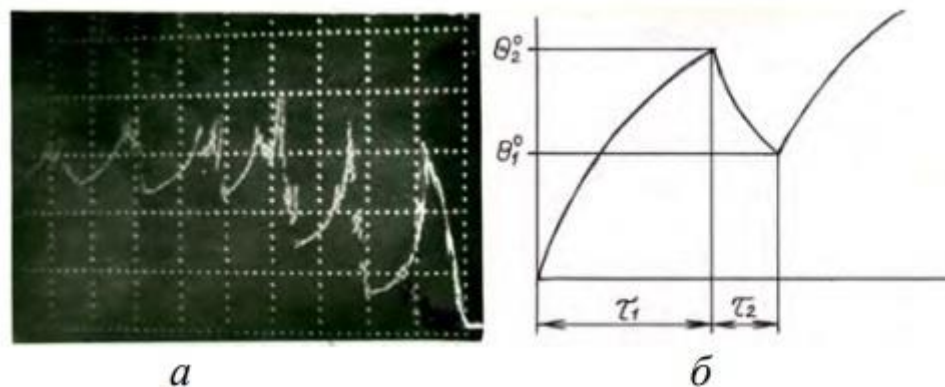


Рисунок 1.5 – Характер зміни температури процесу абразивного оброблення при переривчастому шліфуванні [6]:

а – осцилограма; б – розрахункова схема

Аналізуючи наведені графіки зміни температури при переривчастому абразивному різанні металів можна відмітити факт розходження їх параметрів, зокрема розмаху контактних температур, що свідчить про недосконалість математичної моделі або методики дослідження самої температури.

На рисунку 1.6 представлена залежність температури, яка виникає при плоскому шліфуванні переривчастим абразивними кругом, від кількості канавок  $n$  на робочій поверхні різального інструменту і від величини відношення ріжучого виступу до впадини круга.

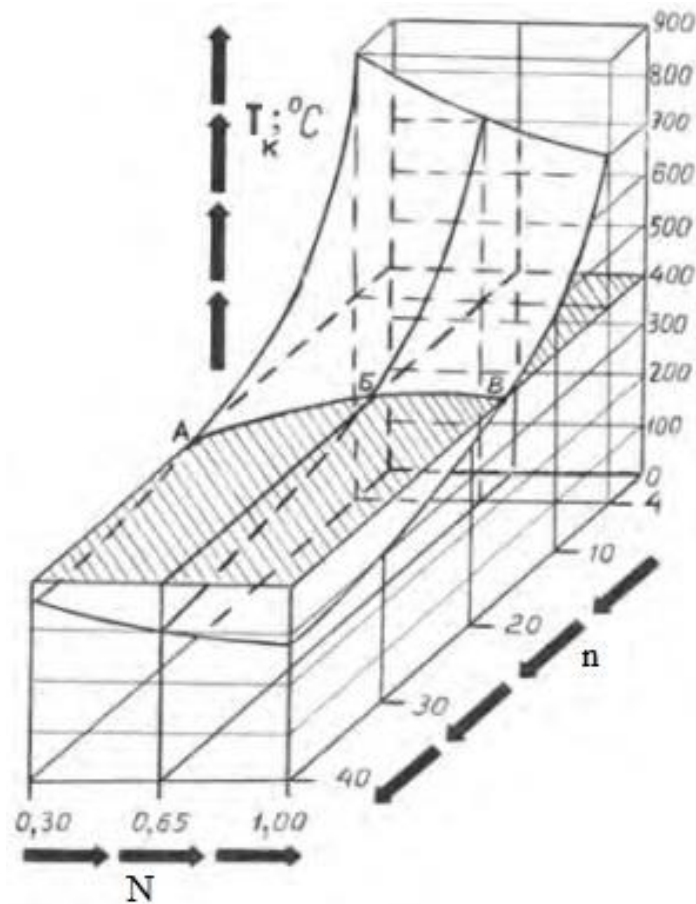


Рисунок 1.6 – Залежність температури шліфування  $T_k$  від числа ріжучих виступів  $n$  на абразивному крузі і величини відношення ріжучого виступу та впадини  $N$  [6]

На наведеному рисунку залежність  $T_k f(N, n)$  виглядає у вигляді площини, нахиленої до площини координат  $(N, n)$  та вигнутої як по відношенню до осі  $N$ , так і відносно координатної осі  $n$ . За характером цих вигинів і кутами нахилів до площини координат  $(N, n)$  видно, що температура переривчастого шліфування зменшується зі збільшенням параметрів  $N$  і  $n$  [6].

### **1.3 Пошук шляхів реалізації завдання по дослідженню температури переривчастого шліфування**

Визначення температури різання металів та її контроль є важливим етапом процесу механообробки, який дає змогу встановити оптимальні режими обробки, що забезпечують високий рівень продуктивності та надійності виробів. Вимірювання температури при переривчастому шліфуванні можна здійснити за допомогою контактних та безконтактних методів, включаючи термопари, що прикріплюються до робочого елемента, та інфрачервоні датчики (пірметри), що вимірюють температуру безконтактно. Застосовуються також методи на основі каліброваних теплових куль або тепловізорів для детальнішого аналізу теплових полів.

Контактний метод вимірювання з використанням термоелектричних давачів є найбільш поширеним та застосовним способом дослідження контактних температур при різання металів. Маленькі термопари встановлюються безпосередньо на поверхні деталі, яка обробляється, або на шліфувальному крузі, що дає можливість отримати точні дані про температуру в місці контакту та проводити її моніторинг в реальному часі.

### **1.4 Постановка завдань до випускної кваліфікаційної роботи**

Дослідження температури різання дискретними абразивними кругами при обробці залізовуглецевих сплавів передбачає виконання ряду завдань теоретичного та практичного характеру.

1. Провести аналіз наявних способів дослідження температури переривчастого абразивного оброблення металевих конструкційних матеріалів.
2. Провести моделювання температури різання процесу переривчастого абразивного оброблення.
3. Провести розробку вимірювального комплексу дослідження температури переривчастого шліфування.

4. Провести дослідження контактних температур процесу переривчастого абразивного оброблення.

5. Дослідити аспекти правки та балансування різального інструменту та їх вплив на точність та надійність процесу абразивного оброблення.

### **Висновки до розділу 1**

1. Температура поверхневого шару матеріалу заготовки в ході її абразивного оброблення є одним з основних факторів, які визначають якість та продуктивність процесу, експлуатаційні властивості виробу, особливо у навантажених та рухомих елементах і вузлах механізмів.

2. Дослідження температури з використанням експериментальних методів є найбільш достовірним способом визначення температури в зоні різання, який дає змогу встановити реальні значення температури, що важко при теоретичних методах дослідження, які не дають змогу врахувати всі фактори впливу через надмірне спрощення реальності під час побудови моделей, відсутності адекватних емпіричних даних для перевірки.

3. Непостійність теплового потоку при переривчастому шліфуванні а також малопрогнозована кількість джерел тепла у вигляді контактів абразивних зерен з поверхнею матеріалу в сукупності з іншими факторами не дають можливості стверджувати у достовірності пропонованих математичних моделей в сфері температурного моніторингу процесу переривчастого абразивного оброблення та вимагають проведення експериментальних досліджень.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Аналіз методів дослідження температури при шліфуванні

Для дослідження теплових явищ процесу переривчастого абразивного оброблення можливе застосування різних методів моніторингу та прогнозування температури різання (рис. 2.1) залежно від умов та можливості реалізації процесу дослідження.

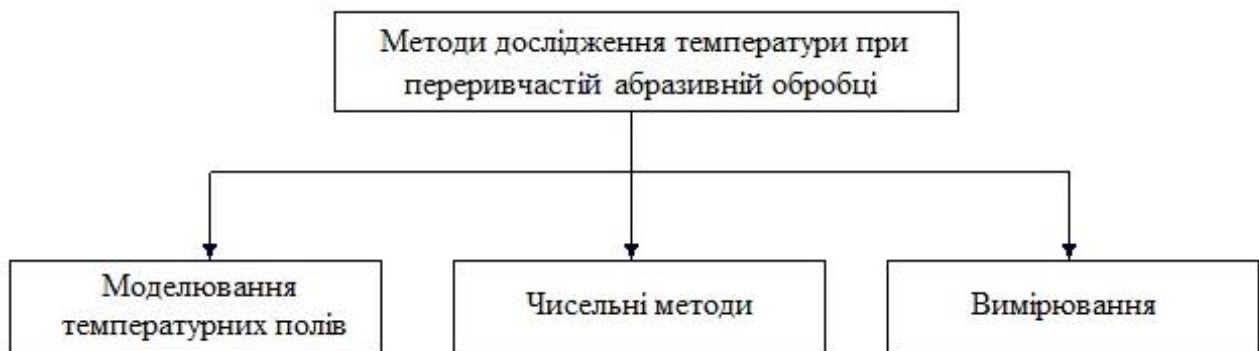


Рисунок 2.1 – Методи дослідження температури різання металів [7]

Моделювання температурних полів та чисельні методи для розрахунку температури в зоні різання дозволяє аналізувати вплив різних параметрів без проведення дорогих експериментів, однак є менш точним за рахунок малопрогнозованого характеру дійсного значення теплових імпульсів різального інструменту, якими є абразивні зерна різної форми, розмірів та хаотичного їх розташування на поверхні круга а також наявність сторонніх факторів впливу, які неможливо оцінити. До числа таких впливових факторів можна віднести неоднорідність матеріалу дослідження, відхилення реальних умов дослідження від прийнятих в розрахункових моделях та ряд інших, які не дають можливості оцінити реальні значення температури, однак можуть без застосування практичних досліджень показати характер зміни досліджуваної величини під впливом досліджуваних факторів без застосування технічного устаткування та вимірювального обладнання.

Побудова математичної моделі процесу шліфування з використанням методу кінцевих елементів передбачає поділ її на невеликі елементи та вирішення рівнянь теплопередачі для кожного такого елемента. Цей метод дозволяє прогнозувати температурний режим за різних умов обробки без проведення експериментів, а також аналізувати вплив різних параметрів (швидкість обертання абразивного круга, подачі, властивості матеріалу) на температуру та потребує точного задання вихідних даних та валідації отриманої моделі з результатами реальних експериментів.

Для реалізації практичного дослідження значень температури при переривчастому шліфуванні застосовуються контактні та безконтактні методи вимірювання (рис. 2.2).

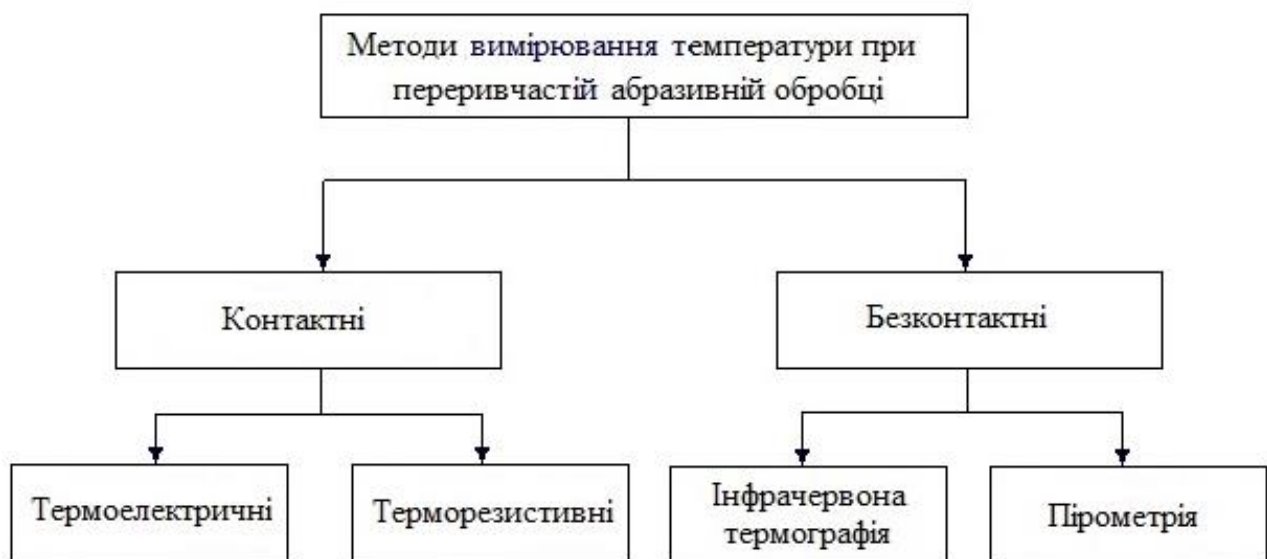


Рисунок 2.2 – Методи вимірювання температури при абразивній обробці металів [8]

Застосування контактних методів вимірювань температури, які реалізуються на використанні таких датчиків температури як термопари, дозволяє отримати точні дані в точці контакту різального інструменту з поверхнею заготовки, але можуть бути обмежені через вібрацію та складність установки в системі верстат-інструмент-заготовка.

Безконтактні методи дослідження температури, наприклад, інфрачервона термографія, надають необхідні дані про розподіл температури по всій поверхні без фізичного контакту, що зручно для дослідження динамічних процесів, однак є менш точними по відношенню до контактних методів [8].

Інфрачервона термографія застосовується для проведення детектування та аналізу процесів теплового випромінювання від поверхні шліфування та побудови температурної карти. Така методика не вимагає фізичного контакту, дозволяє отримати розподіл температури по всій досліджуваній поверхні в реальному часі та підходить для дослідження швидкоплинних процесів, що характерне для переривчастого шліфування. Однак, наявна характерна чутливість методу до коефіцієнта випромінювання об'єкта, що може призвести до спотворення даних за наявності випаровуючих рідин (змащувально-охолоджувальних зокрема) або відбиваючих поверхонь призводить до зменшення точності та застосовуваності такого вимірювання.

Пірометричні вимірювання температури та інтенсивності теплового випромінювання забезпечують отримання значень в одній або декількох досліджуваних точках, що може бути замало для повної картини розподілу температури. Окрім того, при шліфуванні точка контакту заготовки з різальним інструментом є закритою, що значно ускладнює можливість застосування такого методу вимірювання.

## **2.2 Моделювання теплових процесів переривчастого шліфування**

Сьогодні передбачає наступні методи вирішення задач теплопровідності, а саме: аналітичний, чисельний та моделювання. Серед представлених методів, які застосовуються для розв'язку задач по теплопровідності, варто відмітити аналітичний (метод точкових джерел). Даний метод часто застосований саме в технології машинобудування для аналізу теплонапруженості матеріалів при абразивній обробці у роботах Якімова А. В., Сипайлова В. А. та ін.

Такий метод дозволяє пов'язати температурні параметри з режимними параметрами процесу різання. Нестационарний характер роботи переривчастого різального інструменту в процесі шліфування забезпечує можливість зменшення поверхневих температур шляхом циклічного переривання процесу різання та контакту інструменту з заготовкою. Цей процес забезпечується абразивним інструментом з пазами та канавками, які визначають час поетапного теплового насичення та охолодження.

Для рішення теплової задачі, пов'язаної з розрахунком температури в зоні різання у роботі було прийнято наступну теплову схему (рис. 2.3).

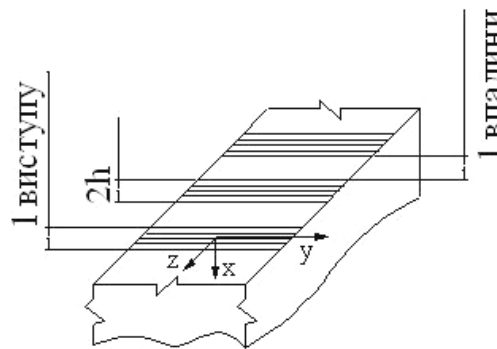


Рисунок 2.3 – Схема теплового джерела при переривчастому шліфуванні [9]

По поверхні заготовки вздовж осі  $Z$  з постійною швидкістю  $V_d$  рухається джерело тепла шириною  $2h$  інтенсивністю  $g$ . Основне диференціальне рівняння теплопровідності (2.1) руху джерела тепла має вигляд [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + v_d \cdot \frac{\partial T}{\partial Z}, \quad (2.1)$$

де  $T$  – температура поверхні заготовки;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$v_d$  – швидкість теплового джерела (заготовки);

$\tau$  – час контакту інструменту з заготовкою.

Задача теплопровідності за виразом (2.1) полягає у рішенні виразу  $T=f(X, Y, Z, \tau)$  методом джерел та описується функцією (2.2) [9]:

$$T(X, Y, Z, X', Y', Z', \tau) = \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z')^2}{4a \cdot \tau}\right), \quad (2.2)$$

де  $Q$  – тепло, яке виділене в місці контакту круга з заготовкою з координатами  $X', Y', Z'$ ;

$c$  – питома теплоємність;

$\rho$  – густина матеріалу.

В ході зміщення джерела в напрямку осі  $Z$  координата джерела відносно середовища  $Z'$  зміниться на величину  $u_\delta \cdot \tau$  та відповідатиме виразу (2.3) [9]:

$$T = \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + u_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right). \quad (2.3)$$

Інтенсивність джерела описується густиною теплового потоку  $g$ , та характеризує величину тепла наданого одиниці довжини за одиницю часу. Рішення задачі можливе шляхом інтегрування виразу (2.3) по  $Y'$  від  $-\infty$  до  $+\infty$ , та  $Z'$  від  $0$  до  $2h$  і за часом від  $0$  до  $\tau$  по формулі (2.4) [9]:

$$T = \int_0^{2h} dZ' \int_{-\infty}^{+\infty} dY' \int_0^\tau \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + u_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right). \quad (2.4)$$

Залежність (2.4) характеризує температуру в ході насичення, яка після інтегрування по  $Y'$  набуде виразу (2.5) [9]:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' &= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' = \\ &= 2\sqrt{a \cdot \tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{Y - Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) \cdot d\left(\frac{Y - Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) = 2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

З врахування інтегралу Гауса  $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-u^2) = \sqrt{\pi}$  отримаємо формулу визначення температури (2.6) [9]:

$$\begin{aligned} T &= \frac{2g \cdot 2\sqrt{\pi \cdot a}}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a)^{3/2}} \cdot \int_0^{2h} dZ \int_0^\tau \frac{\sqrt{\tau}}{\tau^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + \nu_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot d\tau = \\ &= \frac{g}{2c \cdot \rho \cdot \pi \cdot a} \int_0^{2h} dZ \int_0^\tau \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + \nu_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Проінтегрувавши по  $Z'$  та ввівши заміну отримаємо вираз (2.7) [9]:

$$Z_1 = Z - Z'; \quad dZ_1 = -dZ \quad \text{при} \quad \begin{cases} Z' = 0 & Z_1 = Z \\ Z' = 2h & Z_1 = Z - 2h. \end{cases} \quad (2.7)$$

При  $X=0$ , що характерне для поверхні заготовки отримаємо вираз (2.8) [9]:

$$\int_z^{z-2h} \exp\left(-\frac{(Z_1 + \nu_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot dZ_1 = \int_{z-2h}^z \exp\left(-\frac{Z_1 + \nu_\delta \cdot \tau}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dZ_1. \quad (2.8)$$

Ввівши позначення, які описуються виразом (2.9) [9]:

$$\frac{Z_1 + \nu_\delta \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U; \quad \frac{dZ_1}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = dU; \quad dZ_1 = 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot dU, \quad (2.9)$$

Прийнявши межі інтегрування, які описуються виразом (2.10) та (2.11) [9]:

$$\text{при } Z_1 = Z - 2h; \quad \frac{Z - 2h + \nu_\delta \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U_1. \quad (2.10)$$

$$\text{при } Z_1 = Z; \quad \frac{Z + \nu_\delta \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U_2. \quad (2.11)$$

Інтеграл (2.8) набуде вигляду, який описується виразом (2.12) [9]:

$$\begin{aligned} \int_{z-2h0}^z \exp\left(-\frac{Z_1 + \nu_\delta \cdot \tau}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dZ_1 &= 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot \int_{u_1}^{u_2} \exp(-U^2) \cdot dU = \\ &= 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot \left( \int_0^{u_2} \exp(-U^2) \cdot dU - \int_0^{u_1} \exp(-U^2) \cdot dU - \right) = \\ &= 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot (\Phi(U_2) - \Phi(U_1)) = \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau} \cdot (\Phi(U_2) - \Phi(U_1)), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де  $\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^u \exp(-U) \cdot dU$  – функція Лапласа.

Аргументи  $U_1$  та  $U_2$  у виразі (2.12) завжди додатні та відрізняються один від одного на величину, яка описується виразом (2.13) [9]:

$$U_1 - U_2 = \frac{Z + \nu_\delta}{2} - \frac{Z - 2h + \nu_\delta \cdot \tau}{2} = \frac{h}{\sqrt{a \cdot \tau}}. \quad (2.13)$$

Графік (рис. 2.4) показує, що для малих величин аргументу  $U$ , можна функцію  $\Phi(U)$  вважати рівною за 1.

Таким чином, вираз (2.12) набуде вигляду (2.14) [9]:

$$\int_0^{2h} \exp\left(-\frac{X^2 + (Z - Z' + \nu_\delta \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau}\right) \cdot dZ' = \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau} \cdot (1 - \Phi(U_1)). \quad (2.14)$$

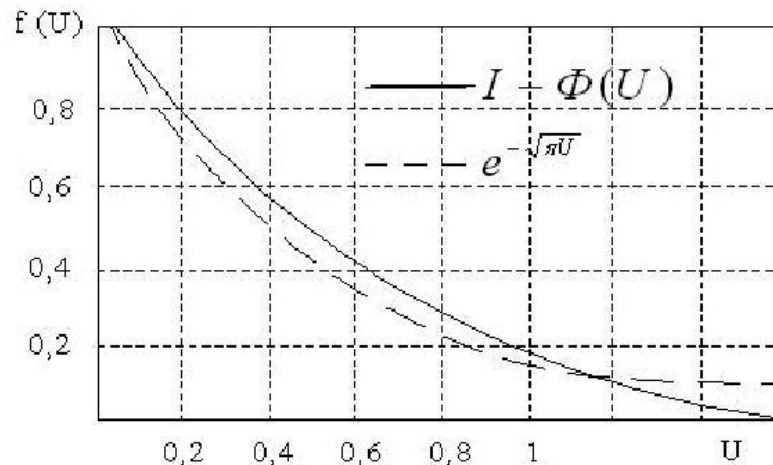


Рисунок 2.4 – Графіки основної та апроксимуючої функції [10]

Отже, температура в процесі теплового насичення набуде виразу (2.15) [9]:

$$T = \frac{g}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau} \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau} \cdot (1 - \Phi(U_1)) \cdot d\tau = \frac{g\sqrt{a}}{2\sqrt{\pi} \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1 - \Phi(U_1)}{\sqrt{\tau}} \cdot d\tau. \quad (2.15)$$

При  $Z=2h$  та  $\tau > 0$  отримаємо значення аргументу  $U_1$ , який описується виразом (2.16) [9]:

$$U_1 = \frac{Z - 2h + v_0 \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = \frac{v_0 \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = \frac{v_0 \cdot \sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}. \quad (2.16)$$

З врахуванням виразу (2.16) отримаємо залежність температури різання яка описується формулою (2.17) [9]:

$$T = \frac{g\sqrt{a \cdot 4\sqrt{a}}}{2\lambda \cdot \sqrt{\pi} \cdot v_0} \cdot \int_0^{\frac{v_0 \sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} (1 - \Phi(U_1)) \cdot dU_1 = \frac{4g \cdot a \sqrt{\pi}}{2\lambda \cdot \pi \cdot v_0} \cdot \int_0^{\frac{v_0 \sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} (1 - \Phi(U_1)) \cdot dU_1. \quad (2.17)$$

Проінтегрувавши праву частину виразу (2.17) частинами отримаємо температуру на задній частині джерела від часу (2.18):

:

$$T = \frac{2g \cdot a}{\lambda \cdot \sqrt{\pi} \cdot \nu_0} \cdot \left[ \frac{\nu_0 \sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}} \left( 1 - \Phi \left( \frac{\nu_0 \sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}} \right) \right) - \frac{\exp \cdot \left( -\frac{\nu_0^2 \cdot \tau}{4a} \right) - 1}{\sqrt{\pi}} \right]. \quad (2.18)$$

Комплекс  $\frac{\nu_0^2 \cdot \tau}{4a}$  є добутком квадрата критерія Пекле ( $P = \frac{\nu_0 \cdot l}{2a}$ ) на критерій Фур'є ( $F = a \cdot \tau / l^2$ ) та визначає час теплового насичення.

Прийнявши  $Q_n = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot \nu_0 \cdot T}{2g \cdot a}$  за відносну температуру, формула (2.18) набуде вигляду (2.19) [9]:

$$Q_n = \sqrt{P^2 \cdot F} \cdot (1 - \Phi(\sqrt{P^2 \cdot F})) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp[(-P^2 \cdot F) - 1] \quad (2.19)$$

Залежність (2.19) дозволяє визначити час, протягом якого температура поверхні досягне якої-небудь заздалегідь заданої величини. На рисунку 2.5 наведено графічну залежність виразу (2.21) від критеріїв  $P^2 \cdot F$ .

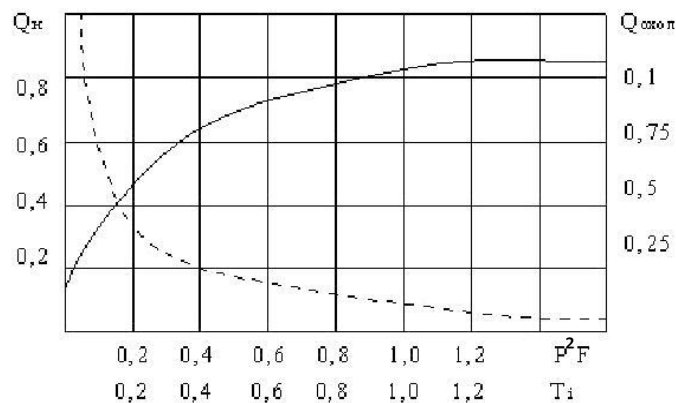


Рисунок 2.5 – Зміна значення відносної температури залежно від часу теплового насичення [10]:

- – залежність  $Q_n$  від комплексу  $P^2 \cdot F$ ,
- — залежність  $Q_{охла}$  від комплексу  $T_i$

Температура охолодження визначається за виразом (2.20) [9]:

$$Q_{\text{охол}} = \exp T_i^2 \cdot [1 - \Phi(T_i)], \quad (2.20)$$

де  $T_i = \frac{\alpha \cdot \sqrt{\tau_{\text{охол}}}}{\lambda \cdot c \cdot \gamma}$  – критерій Тихонова.

Графічне представлення залежності температури від швидкості руху заготовки наведено на рисунку 2.6.

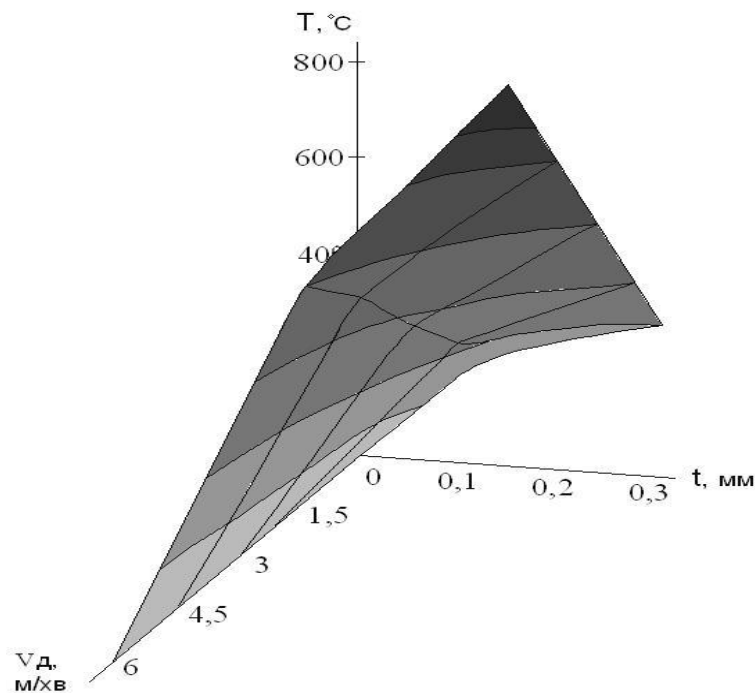


Рисунок 2.6 – Залежність температури від швидкості заготовки та товщини припуску

Наведена залежність температури при переривчастому шліфуванні дає можливість прогнозувати її значення залежно від режимних параметрів процесу різання та досягати необхідного рівня якості поверхневого шару з відсутніми тепловими дефектами.

## 2.3 Розробка вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні

Принцип роботи вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні побудований на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та його цифровізацію за допомогою аналого-цифрового перетворювача для зручності сприйняття інформації. На рисунку 2.7 представлена структурна схема вимірювальної системи.

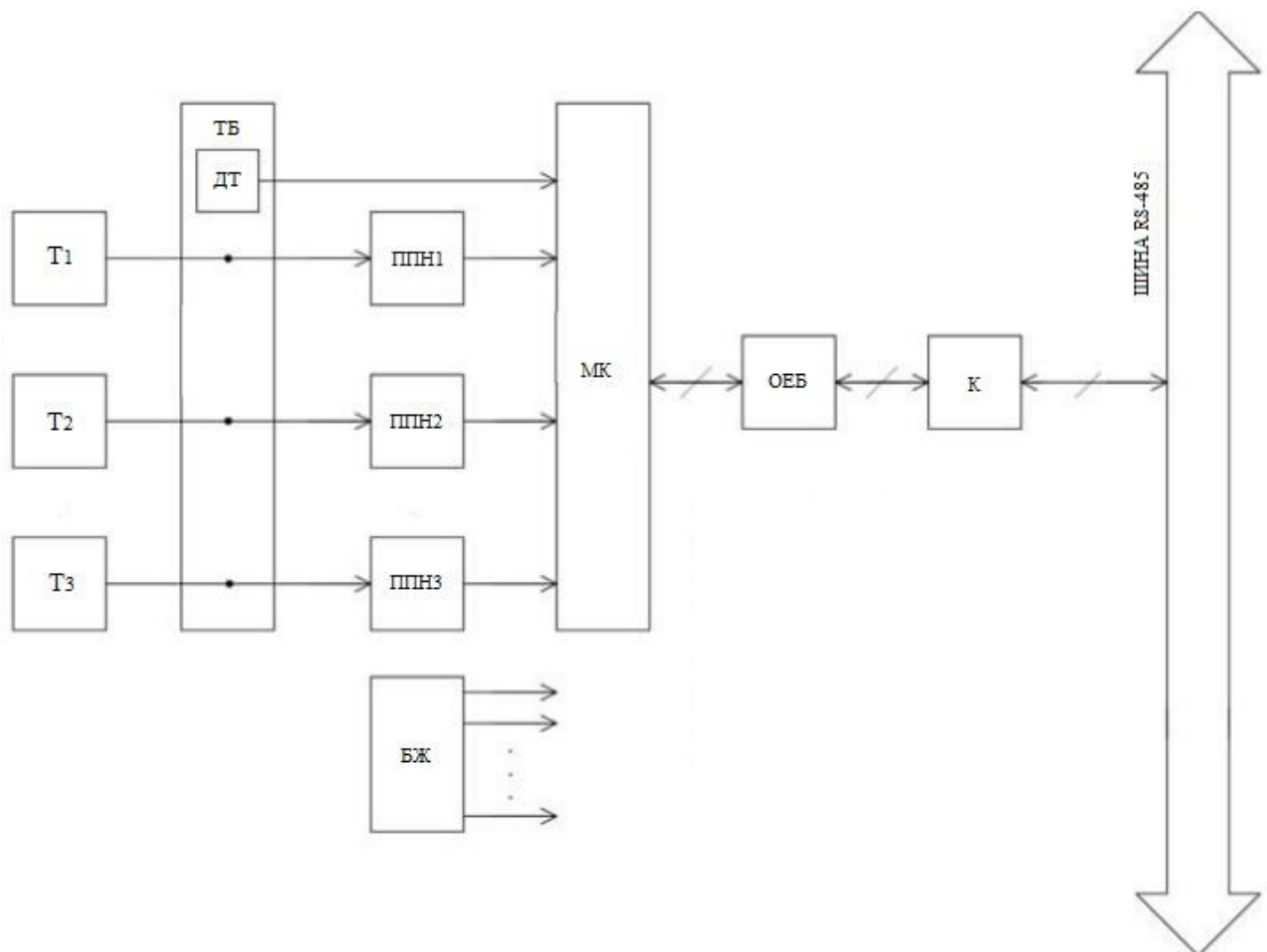


Рисунок 2.7 – Структурна схема вимірювальної системи:

T1, T2, T3 – датчі температури; ТБ – термоблок; ДТ – датч значення температури холодного спаю; ППН1, ППН2, ППН3 – підсилювачі термоелектрорушійна сила; МК – мікроконтролер; БЖ – блок живлення; ОЕБ – оптоелектронний блок; К – контролер

Давачі температури  $T_1$ ,  $T_2$  та  $T_3$  розміщуються у різних точках контакту різального інструменту з заготовкою в напрямку її руху з метою кращого її контролю. Для забезпечення більшої точності температури різання в ході обробки матеріалу використана компенсація температури холодних спаїв за рахунок застосування термічного блоку, який забезпечує мале значення градієнта температур між вільними кінцями термодавачів а значення їх температури забезпечується давачем ДТ.

Сформовані термоелектричними давачами сигнали передаються в термоблок, в якому проходить компенсація через різницю гарячого та холодного спаю термопар, підвищуючи при цьому точність вимірювання. Напряга сформована термопарою складає мале значення (4,1276 мВ) на кожні 100 °С та при температурі навіть 1000 °С складе всього 41 мВ, що є досить малою величиною [11]. З метою підвищення сигналу термопар вимірювальна система передбачає наявність підсилювачів постійного струму для подальшої передачі підсиленого сигналу вимірювальної інформації до мікроконтролера для забезпечення цифровізації сигналу.

Структурна схема вимірювального каналу системи вимірювання температури при різанні представлена на рисунку 2.8.

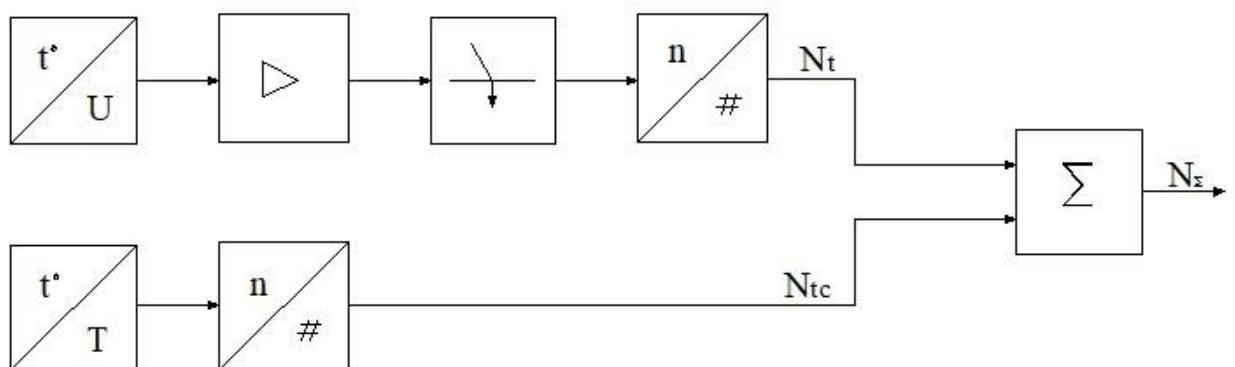


Рисунок 2.8 – Структурна схема вимірювального каналу

Значення напруги на виході термоелектричного давача визначається залежністю (2.21) [12]:

$$U_{ТП} = k_{ТП} \cdot (t_p - t_{xc}), \quad (2.21)$$

де  $k_{ТП}$  – коефіцієнт перетворення термоелектричного давача;

$t_p$  – досліджувана температура;

$t_{xc}$  – значення температура холодного спаю термоелектричного давача.

Забезпечення компенсації температури термопари забезпечується датчиком TMP05, який має можливість перетворення температури на електричні імпульси з затримкою у часі залежно від величини температури.

Датчик температури має функцію перетворення вимірювального сигналу, яка описується залежністю (2.22) [12]:

$$U_T = k_d \cdot t_p, \quad (2.22)$$

де  $U_T$  – напруга датчика;

$k_d$  – коефіцієнт перетворення датчика;

$t_p$  – досліджувана температура.

Вираз перетворення вимірювального каналу відповідно матиме вигляд (2.23) [12]:

$$N_t = U_t \cdot K_{ПС} \cdot K_{АК} \cdot K_{АЦП}, \quad (2.23)$$

де  $N_t$  – цифровий код на виході;

$U_t$  – напруга з термоелектричного давача;

$K_{ПС}$  – коефіцієнт підсилення;

$K_{АК}$  – коефіцієнт передачі сигналу аналоговим комутатором;

$K_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Перетворення сигналу холодного спаю термопари описується виразом (2.24) [12]:

$$N_{tc} = T \cdot K_{АЦП}, \quad (2.24)$$

де  $T$  – час імпульсу;

$K_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Вираз сумарного перетворення вимірювального каналу матиме вигляд (2.25) [12]:

$$N = (U_t \cdot K_{НПІ} \cdot K_{АК} \cdot K_{АЦП}) + (T \cdot K_{АЦП}). \quad (2.25)$$

Похибка вимірювального каналу описується виразом (2.26) [12]:

$$\gamma = \gamma_{ПС} + \gamma_{АК} + \gamma_{АЦП}, \quad (2.26)$$

де  $\gamma_{ПС}$  – приведена похибка підсилювача сигналу;

$\gamma_{АК}$  – приведена похибка передачі сигналу аналоговим комутатором;

$\gamma_{АЦП}$  – приведена похибка перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Згідно технічних характеристик вимірювальної системи її приведена похибка, яка описується виразом (2.27) [12] не повинна бути більшою:

$$\gamma = [\Delta / t_{\max}] \cdot 100\% = [5 / 1000] = 0,5\%. \quad (2.27)$$

де  $\Delta$  – абсолютна похибка вимірювальної системи;

$t_{\max}$  – максимальне значення температури, яке здатна заміряти система.

Похибка квантування аналого-цифрового перетворювача визначається за формулою (2.28) [20] складе:

$$\gamma_{АЦП} = \frac{1}{2^{n+1}} \cdot 100\% = \frac{1}{2^{12+1}} \cdot 100\% = 0,012\%, \quad (2.28)$$

де  $n$  – розрядність аналого-цифрового перетворювача (12 бітний у нашому випадку).

Похибка комутатора в сумі з похибкою АЦП виражається виразом (2.29):

$$\gamma_{AK} + \gamma_{АЦП} = 0,01\% + 0,012\% = 0,022\%. \quad (2.29)$$

Похибка підсилювача сигналу згідно виразу (2.26) визначиться за формулою (2.30) та складе:

$$\gamma_{ПС} = \gamma \cdot (\gamma_{AK} + \gamma_{АЦП}) = 0,5 \cdot 0,022 = 0,478\%. \quad (2.30)$$

Функціональна схема вимірювальної системи наведена на рисунку 2.9.

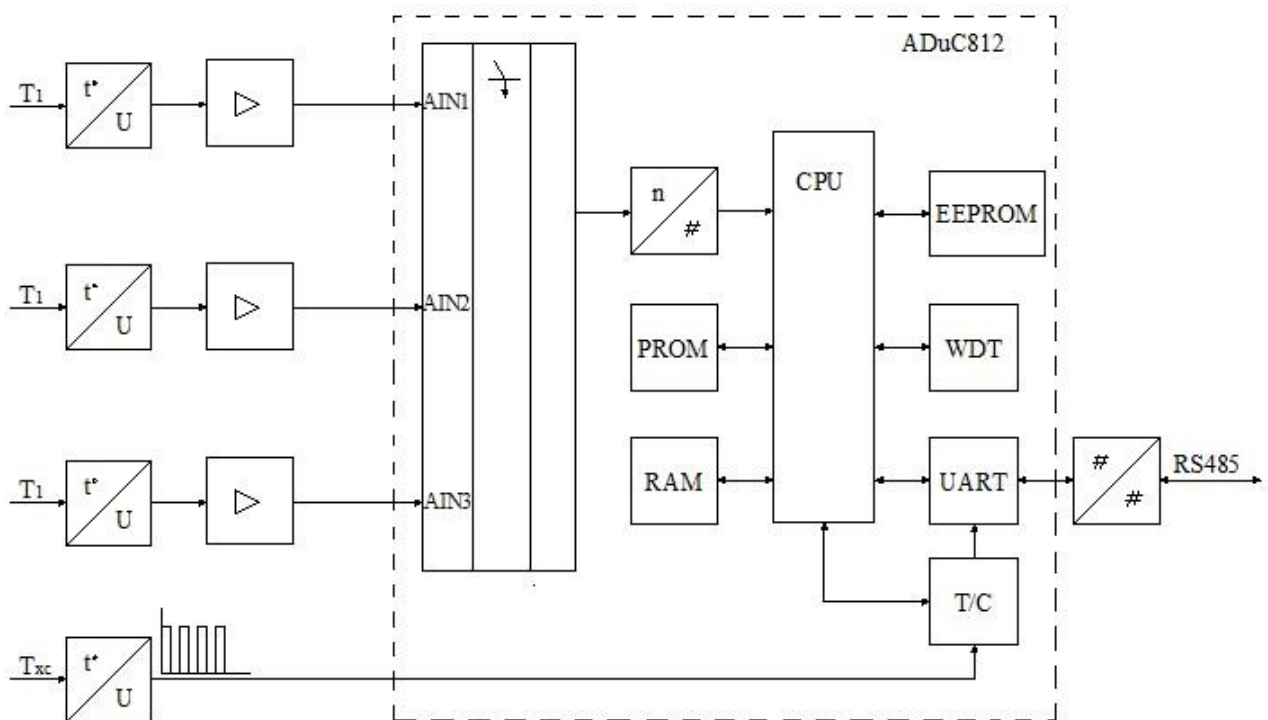


Рисунок 2.9 – Функціональна схема вимірювальної системи:

$T_1, T_2, T_3$  – термоелектричні давачі;  $T_{xc}$  – давач температури холодного спаю;  $\Delta$  – підсилювачі; CPU – процесор; PROM – постійний пристрій запам'ятовування; RAM – оперативна пам'ять; WDT – слідкуючий таймер; EEPROM – запам'ятовуючий пристрій з електричним стиранням;  $U_{ART}$  – інтерфейс;  $\swarrow$  – комутатор; RS485 – системний інтерфейс

Вимірювання температури різання починається з визначення контактних температур круга з заготовкою за допомогою термоелектричних давачів  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , які перетворюють її в аналогову термоелектрорушійну силу. Далі аналогові сигнали підсилюються та надходять на входи комутатора AIN1, AIN2, AIN3 який перемикає їх поетапно один за одним та надсилає на вихід (OUT). З вихідного каналу комутатора вимірювальний сигнал передається до АЦП з наступним його перетворенням на цифровий. Далі сигнал надходить до мікроконтролера (CPU) для його обробки. Для підвищення точності, у вимірювальній системі передбачений датчик температури холодного спаю термопари ( $T_{xc}$ ). Сигнал з нього надходить на цифровий вхід CPU та забезпечує компенсацію температури. Процесор (CPU) забезпечує обробку цифрових даних та керує роботою інших частин системи, зберігаючи необхідні дані в пам'яті EEPROM та застосовуючи пам'ять (RAM) для накопичення інформації в ході обробки. Постійна пам'ять (PROM) застосовується для зберігання прошивки та необхідних програмних продуктів. Слідкуючий таймер (WDT) здійснює контроль роботоздатності CPU та забезпечує його перезавантаження у разі його підвисання. Опрацьована інформація за допомогою приймача/передавача (UART) надходить на інтерфейс RS-485 для можливості дистанційної її передачі, який забезпечує передачу даних на великі відстані та можливості підключення додаткових пристроїв обробки інформації.

## **Висновки до розділу 2**

1. Для практичного дослідження температури різання, зокрема абразивного оброблення металів доцільно застосовувати контактні методи вимірювання з використанням термоелектричних або терморезистивних перетворювачів температури. Використання безконтактних методів температурометрії є недоцільним через закритість зони різання та меншою точністю по відношенню до контактних методів.

2. Термоелектричний метод вимірювання температури дає можливість проводити вимірювання в широких межах від  $-50$  до  $+1500$  °C, має на виході електричний сигнал, що дає можливість дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації у вигляді термо ЕРС, легко інтегрується у цифрові інформаційні системи обробки інформації та забезпечує високу точність, що робить це метод вимірювання широкозастосовним у багатьох сферах, зокрема обробки металів (плавлення, різання, гартування).

3. Питання теплонапруженості багатьох процесів, різання металів зокрема, можна вирішити такими методами як аналітичний, чисельний та моделювання. Аналітичний метод (точкових джерел) досить часто застосовується в технології машинобудування для аналізу теплонапруженості матеріалів в ході їх обробки. Наведена залежність температури при переривчастому шліфуванні дає можливість прогнозувати її значення залежно від режимних параметрів процесу різання з відсутніми тепловими дефектами.

4. Проведено розробку вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні побудованої на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та його цифровізацію. Використання мікроконтролера, ізотермічного блоку та оптоелектронного блоку дають змогу проводити обробку інформації, дистанційної передачі та підвищення її точності.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

#### 3.1 Опис експериментальної установки

Дослідження температури шліфування проводилось для підшипникової сталі на двосторонньому торцешліфувальному верстаті (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Торцешліфувальний верстат

Для визначення температури матеріалів, особливо в ході їх технологічної обробки (різання, гартування та ін.) переважно застосовують термоелектричні датчики (рис. 3.2), діапазон вимірювань яких сягає від  $-50$  до  $1500$  °C [11]. Широкий діапазон можливих температур, висока чутливість та мала інерційність сприяють застосуванню датчиків цього типу для вимірювання температури різання металів.

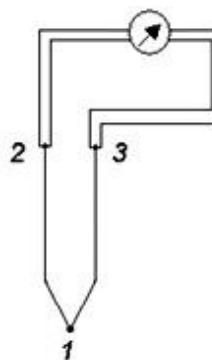


Рисунок 3.2 – Термопара з засобом реєстрації термо ЕРС [12]

Спай 1 термопар є робочим і розташовується в зоні контакту різального інструменту з заготовкою. Спаї в точках 2, 3 (рис. 3.2) передають сигнал про стан температури у формі аналогової ЕРС для подальшої обробки. Термоелектричні давачі, які широко використовуються для вимірювань температури наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Види найтипівіших термопар [12]

Назва термопар	Позначення типу	Діапазон температур термопар при її необмеженому застосуванні в часі, °С		Верхня межа термопар при короткочасному її застосуванні, °С	Середнє значення термо ЕРС на кожні 100°С, мВ
		нижня	верхня		
Платино-родій – платинова	ТПП	-20	1300	1600	1,04
Платино – родієва	ТПР	300	1600	1800	0,9
Хромель – алюмелева	ТХА	-50	1000	1300	4,13
Хромель – копелева	ТХК	-50	600	800	8,03

Вибір термоелектричного давача необхідно проводити з врахуванням його необхідного діапазону вимірювання та величини індукованої електрорушійної сили. Вибираєм хромель-алюмелеву термопару з діапазоном від -50 до 1000 °С з термо ЕРС рівною 4,127 мВ на 100 °С. Така термопар має досить високу чутливість та невисоку вартість, проста та надійна в експлуатації.

Градувальна характеристика хромель-алюмелевої термопари наведена на рисунку 3.3.

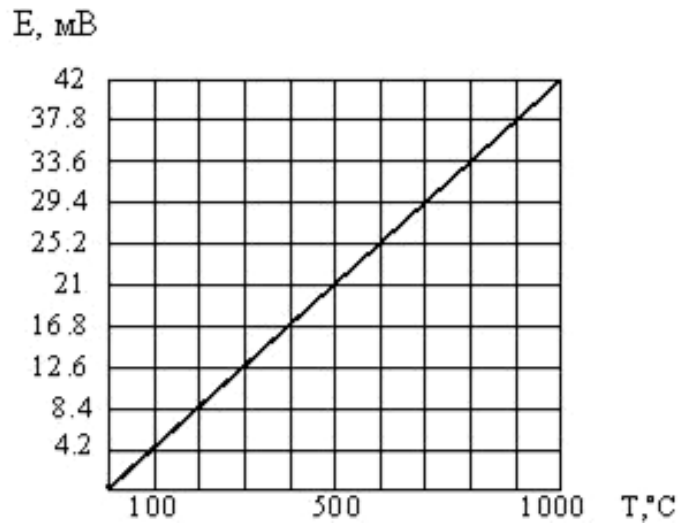


Рисунок 3.3 – Градувальна характеристика хромель-алюмелевого термоелектричного давача [12]

Підвищення сигналу термоелектричного давача забезпечується підсилювачем AD8551, схема якого наведена на рисунку 3.4.

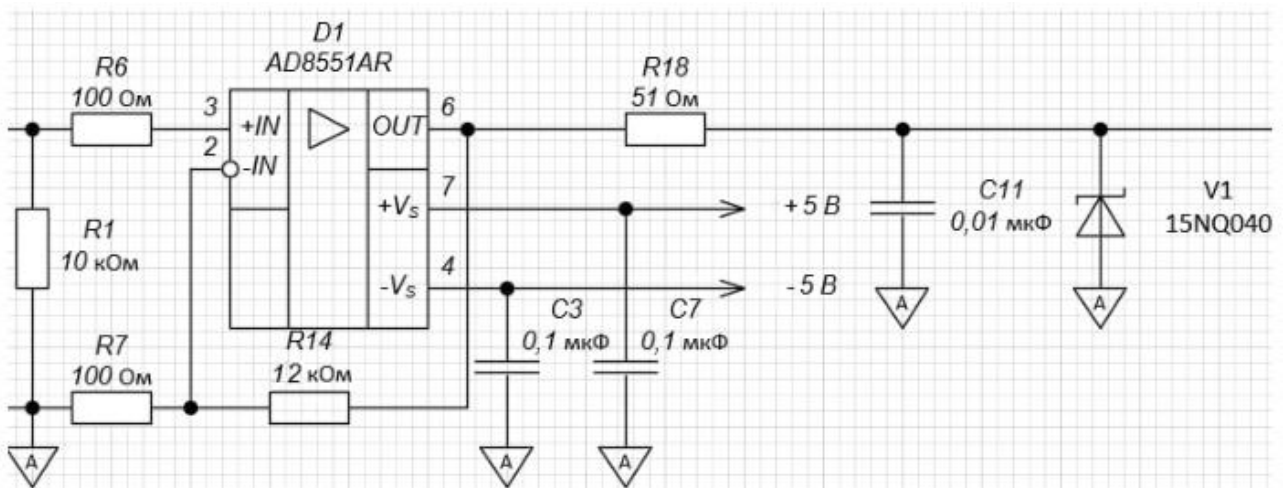


Рисунок 3.4 – Включення підсилювача AD8551 [13]

Коефіцієнт підсилення  $K_{\text{пн}}$  сигналу термодавача виражається формулою (3.1) [13]:

$$K_{\text{пнн}} = \frac{R7 + R14}{R7}. \quad (3.1)$$

Враховуючи величину номінального значення термо ЕРС давача, яке становить  $E=41,276$  мВ, та задаючись величиною напруги на виході підсилювача ( $V_{\text{OUT}}$ ) 5 В, отримаємо величину коефіцієнта підсилення (3.2) [13]:

$$K_{\text{пнн}} = \frac{V_{\text{OUT}}}{E} = \frac{5}{4,1276 \cdot 10^{-2}} = 121, \quad (3.2)$$

де  $V_{\text{OUT}}$  – напруга на виході підсилювача, В;

$E$  – напруга на виході термоелектричного давача для верхнього порогу вимірювання температури (в нашому випадку  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

Величину опору  $R14$  розрахуємо за виразом (3.3) [13]:

$$R14 = K_{\text{пнн}} \cdot R7 - R7 = 121 \cdot 100 - 100 = 12 \text{кОм}, \quad (3.3)$$

де  $K_{\text{пнн}}$  – коефіцієнт підсилення;

$R7$  – опір, Ом.

Вибираємо резистори  $R7$  та  $R14$  типу С2-29В.  $R7$ : С2-29В-0,125-100 Ом  $\pm$  1%;  $R14$ : С2-29В-0,125-12 кОм  $\pm$  1% [12].

Структура вимірювального комплексу дослідження температури при абразивній обробці представлена на рисунку 3.5.

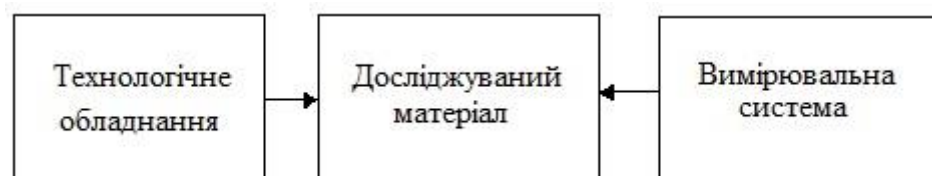


Рисунок 3.5 – Структура вимірювального комплексу дослідження температури абразивного оброблення матеріалу

В якості технологічного устаткування виступає торцешліфувальний автомат. Вимірювальна система описана в розділі 2. Досліджуваний матеріал – підшипникова сталь.

### 3.2. Планування та проведення експериментальних досліджень температури переривчастого шліфування

Метою проведення експериментального визначення температури переривчастого шліфування полягає у необхідності забезпечення точності результатів досліджуваних параметрів та перевірки математичних моделей і гіпотез. Планування досліджень величини температури при абразивній обробці полягає у розробці плану дослідження проведення температури, який передбачатиме послідовність проведення такого дослідження для досягнення максимальної точності результатів дослідження при прийнятій кількості дослідів та факторів впливу на досліджувану величину.

Згідно технологічної схеми шліфування торців кілець підшипників (рис. 3.6) впливовими факторами, які мають безпосередній вплив на температуру різання та мають бути враховані є глибина та швидкість різання, швидкість подачі заготовки.

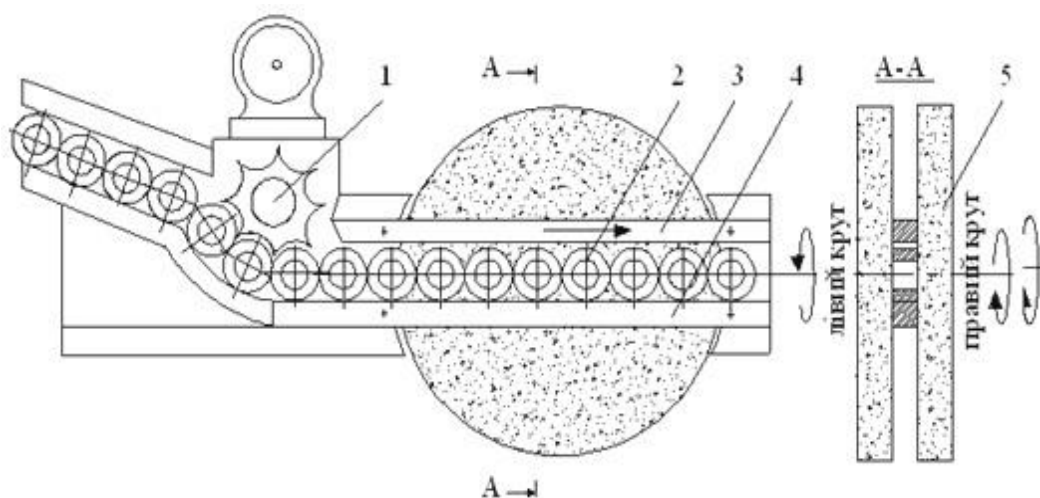


Рисунок 3.6 – Схема абразивної обробки торців кілець підшипників [14]:

1 – привідна зірочка; 2 – заготовка; 3, 4 – напрямні; 5 – абразивний інструмент

Вимірювання температури проведено при факторах впливу, наведених в таблиці 3.2. Кількість досліджень температури за впливовими факторами представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Комплекти факторів експерименту

Фактор	Одиниця вимірювання	Кількість факторів
X1 – оброблюваний матеріал X11 – ШХ15	–	–
X2 – швидкість заготовки V <sub>з</sub> X21 – 2 X22 – 4 X22 – 6	м/хв	3
X3 – Швидкість круга, V <sub>кр</sub> X31 – 26 X32 – 28 X33 – 30	м/с	3
X4 – глибина припуску, t X41 – 0,1 X42 – 0,2 X43 – 0,3	мм	3
X5 – матеріал інструменту X51 – електрокорунд на бакелітовій зв’язці	–	–

Таблиця 3.3 – Матриця планування досліджень процесу шліфування

№ п/п	Дослідні змінні фактори				Матеріал круга  X5	Фактор результату Y(Текс.)
	Матеріал заготовки x1	Швидкість руху заготовки x2(V <sub>д</sub> ) [м/хв]	Швид- кість круга x3(V <sub>кр</sub> ) [м/с]	Глибина зняття матеріалу x4(t) [мм]		
n1	x11	x21÷x23	x31÷x33	x41÷x43,	x51	y11, y12, y13, y14, y15, y16
.	x11	x21÷x23	x31÷x33	x41÷x43,	x51	
.						
.						
пn	x11	x21÷x23	x31÷x33	x41÷x43,	x51	

Температура шліфування знайдена дослідним шляхом методом закладної термомпари та аналітично за виразом 2.20. Залежність температури шліфування від режимних параметрів обробки матеріалу представлено в таблиці 3.4. Дослідження значення температури при абразивній обробці від таких факторів як  $V_{кр}$ ,  $V_d$  та  $t$  для підшипникової сталі ШХ15 показало, що для усіх застосовуваних режимах різання температура в зоні контакту менша при переривчастому шліфуванні, а різниця температур більша при інтенсифікації режимів обробки. Зменшення швидкості абразивного круга негативно відображається на шорсткості поверхні матеріалу [14], тому основними технологічними факторами впливу на теплонапруженість процесу абразивного оброблення є швидкість подачі заготовки та величина припуску, який знімається в ході обробки матеріалу.

Таблиця 3.4 – Значення температури в ході абразивної обробки підшипникової сталі отримані експериментальним шляхом

Режимні параметри процесу різання			Переривчастий абразивний круг		Звичайний абразивний круг
$V_d$ м/хв	$t$ мм	$V_{кр}$ м/с	$T_{теор.}$ °С	$T_{екс.}$ °С	$T_{екс.}$ °С
1,5	0,1	30	338	321	422
1,5	0,2	30	384	369	480
1,5	0,3	30	433	416	553
3	0,1	30	475	453	581
3	0,2	30	509	484	638
3	0,3	30	539	516	664
4,5	0,1	30	577	564	724
4,5	0,2	30	601	582	772
4,5	0,3	30	628	612	788
6	0,1	30	661	645	846
6	0,2	30	700	678	886
6	0,3	30	734	701	921

Температура при абразивній переривчастій обробці для запропонованої конструкції переривчастого інструменту в середньому на 30% менша у порівнянні з традиційним абразивним обробленням суцільним кругом та дозволяє проводити інтенсифікацію режимних параметрів процесу різання та уникнути теплових дефектів, таких як припіки та мікротріщини.

### Висновки до розділу 3

1. Знаходження температури різання металів та їх сплавів дослідним шляхом з використанням контактних методів вимірювань є найбільш точним способом визначення ступеня нагрятості зони контакту різального інструменту з заготовкою та дає можливість повної та достовірної оцінки математичних моделей теплового стану процесів різання.

2. Для знаходження температури різання матеріалів, гартування та плавлення зазвичай застосовують термоелектричні давачі, які мають діапазон від  $-50$  до  $1500$  °C. Широкий діапазон можливих температур, висока чутливість та мала інерційність, простота та надійність сприяють застосуванню давачів цього типу для вимірювання температури різання металів та застосуванню їх в системах моніторингу та контролю теплового стану процесів.

3. Проведено визначення температури шліфування підшипникової сталі методом закладної термопари в ході її обробки. Дослідження значення температури при абразивній обробці від таких факторів як  $V_{кр}$ ,  $V_d$  та  $t$  для сталі ШХ15 показало, що для усіх застосовуваних режимах різання температура в зоні контакту менша при переривчастому шліфуванні, а різниця температур більша при інтенсифікації режимів обробки. Зменшення швидкості абразивного круга негативно відображається на шорсткості поверхні матеріалу, тому основними технологічними факторами впливу на теплонапруженість процесу абразивного оброблення є швидкість подачі заготовки та величина припуску, який знімається в ході обробки матеріалу.

4. Температура при абразивній переривчастій обробці для запропонованої конструкції переривчастого інструменту в середньому на 30% менша у порівнянні з традиційним абразивним обробленням суцільним кругом та дозволяє проводити інтенсифікацію режимних параметрів процесу різання та уникнути теплових дефектів, таких як припіки та мікротріщини.

## РОЗДІЛ 4

### СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Балансування та правка різального інструменту шліфувальних верстатів

Шліфувальний абразивний різальний інструмент, як і будь-який інший різальний та витратний матеріал протягом певного часу його експлуатації втрачає свої робочі характеристики та виходить з ладу. Для збільшення часу роботи абразивного інструменту та забезпечення безпеки в ході його використання необхідно проводити операції з його налаштування, однією з яких є балансування. Від того, наскільки правильно та точно буде проведено налагодження різального інструменту, залежать не тільки його експлуатаційні характеристики, а й безпека оператора технологічного обладнання. При цьому необхідно враховувати, що чим більший діаметр абразивного інструменту, тим більшу увагу необхідно приділяти його балансуванню. При переривчастому шліфуванні абразивний інструмент має на своїй поверхні ряд канавок певної форми, що призводить до дисбалансу та потребує балансування як до початку його застосування так і в процесі роботи. Незбалансований та нерівноважений абразивний інструмент при обертанні з високою швидкістю на шпинделі верстата призводить до появи вібрації, зростання шорсткості поверхні матеріалу та руйнування самого різального інструменту. Його уламки становлять серйозну небезпеку для оператора та оточуючих людей. Саме тому правильне балансування та надійне кріплення абразивних кругів є одним з головних правил техніки безпеки під час роботи на шліфувальних верстатах, що забезпечує безпечність праці та необхідний рівень якості оброблюваної поверхні. Недостатньо збалансований абразивний різальний інструмент значно знижує продуктивність процесу механообробки, що проявляється у зниженні якості оброблюваної поверхні та виході з ладу окремих вузлів та навіть цілого верстата. Це загрожує, наприклад, передчасним виходом з ладу шпиндельного вузла та іншими несправностями.

Розбалансування шліфувальних кругів є ознакою того, що між центром тяжіння круга та його центром обертання, які як правило повинні бути на одній осі, не має збіжності.

Основними характерними причинами, які призводять до незрівноваженості абразивного інструменту є [15]:

- зношений або пошкоджений круг із порушеною його геометрією;
- неоднорідна щільність матеріалу абразивного круга;
- неправильне встановлення абразивного круга на шпиндель верстату;
- ексцентричне розташування отвору щодо зовнішньої поверхні.

Зрозуміти, що абразивний різальний інструмент неврівноважений, можна через нехарактерну вібрацію пристрою у включеному стані. Круг починає вібрувати, якість роботи помітно знижується і в цілому виконати процес шліфування деталі стає проблематично. У такому випадку необхідно негайно вимкнути верстат та провести балансування різального інструменту.

Шліфувальний круг може вважатися збалансованим лише тоді, коли його центр тяжіння повністю збігається з віссю його обертання, тобто шпинделя верстата. Тільки у такому випадку робота різального інструменту на високій швидкості проходитиме правильно без негативного впливу на оброблювану поверхню.

Перед балансуванням абразивний круг необхідно очистити від забруднень і перевірити наявність сколів і тріщин та при їх наявності замінити на новий.

Балансуванню підлягають усі абразивні круги, діаметр яких перевищує 100 міліметрів з використанням наступних методів [16]:

- динамічний;
- статичний.

Для динамічного способу потрібне спеціальне обладнання та професійний майстер з балансування. Такий метод забезпечує високу точність результату балансування, але через високу вартість має менше застосування у порівнянні зі статичним способом.

Статичне балансування абразивного різального інструменту можна проводити за допомогою двох паралельних лінійок або циліндричних валиків, які горизонтально закріплюються на шліфувальному верстаті. На ньому встановлюється оправка, після чого проводиться балансування. Врівноважений абразивний круг повинен вільно обертатися навколо своєї осі, у протилежному випадку важка його частина відразу потягне його донизу. Інший статистичний метод передбачає використання балансувальних ваг. Однак він не підходить для абразивних кругів діаметр яких перевищує 600 міліметрів.

Сьогодні виробники електричного обладнання випускають моделі із системою автоматичного балансування абразивних різальних кругів. Коштують такі верстати дорожче, проте наявне автобалансиування значно знижує рівень вібрації. Це, у свою чергу, робить процес комфортнішим, а термін експлуатації – довшим.

Постійне слідкування за коливанням дисбалансу абразивного круга та повна автоматизація процесу балансування забезпечує високу якість оброблюваної поверхні. Пристрій автоматичного балансування складається з електронного вимірювального приладу з датчиком коливань. Неврівноваженість шліфувального круга визначається вимірювальним пристроєм. Врівноважуюче середовище у формі рідини, яка використовується в верстаті для охолодження, подається через клапан за командою електронно-вимірювального пристрою. Рідина надходить із блоку сопел, змонтованого на захисному кожусі. Кількість рідини, необхідної для врівноваження дисбалансу абразивного круга, вприскується до того часу, поки не буде досягнутий допустимий рівень коливань шпинделя верстата.

На рисунку 4.1 наведений технічний пристрій, який здійснює автоматичне балансування шліфувального круга завдяки сигналам датчика тиску. У виконавчому пристрої є два електричні мікродвигуни, які обертаються разом з кругом і переміщують балансувальні вантажі у взаємно-перпендикулярних напрямках.

На рисунку 4.1 показана схема керування тільки одним двигуном, керування іншим є аналогічною. Датчиком є гідростатичний підшипник, тиск рідини в кишнях якого залежить від радіального зусилля на крузі. Тиск у кишнях передається на два сильфони 3, які вимірюють різницю тисків у протилежних кишнях. Різниця перетворюється на зсув якоря 4 індуктивного перетворювача 5 і відповідно електричний сигнал. Сигнал посилюється і подається через контактні щітки 7 колектор 8 на виконавчий двигун 9, який, обертаючись, переміщає балансувальний вантаж 10 в потрібному напрямку.

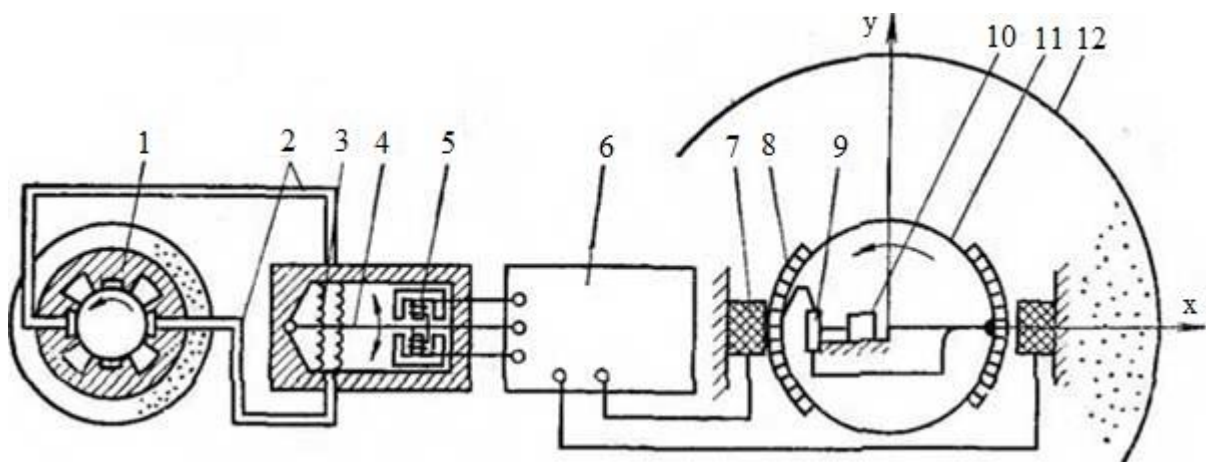


Рисунок 4.1 – Система автоматичного балансування абразивних різальних інструментів [16]:

1 – гідростатичний підшипник механізму балансування; 2 – трубопроводи; 3 – сильфон, 4 – якорь індуктивного датчика переміщення; 5 – котушка індуктивного датчика переміщення, 6 – електронна схема підсилення сигналу індуктивного датчика; 7 – щітки електродвигуна; 8 – колектор, 9 – електродвигун, 10 – вантаж балансувальний; 11 – шпиндель верстата; 12 – різальний абразивний інструмент

Зазначена система дозволяє регулювати радіальний тиск круга на оброблюваний виріб та гасить вібрації, зумовлені дисбалансом абразивного круга. Врівноваженість інструменту порушується при його зношенні. Крім того, у порах круга адсорбується охолоджувальна рідина, коли верстат вимкнений, рідина стікає по порах круга до нижньої його частини та зумовлює дисбаланс.

Правка абразивного різального інструменту являє собою процес відновлення його правильної форми та початкової ріжучої здатності. Цей процес дає змогу усунути недоліки абразивного круга, набуті в ході його виготовлення або застосування. Для відновлення форми та забезпечення рівності його робочої поверхні застосовуються різні методи (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Основні способи механічного правлення абразивного різального інструменту [16]

Будь-які методи правки шліфувальних інструментів полягають у механічній обробці їх зовнішньої поверхні для усунення нерівностей та обточування абразивних зерен.

Обточування абразивного різального інструменту є найбільш ефективним методом правки шліфувального круга, який включає в себе механічну обробку верхньої поверхні спеціальними інструментами. Основним призначенням відновлювального процесу абразивного круга обточуванням полягає у видаленні з його поверхні засоленості зумовленої відходами шліфування, щоб повернути йому високу різальну здатність та правильну геометрію. Для процесу обточування абразивних кругів використовуються правлячі інструменти з високим ступенем твердості, такі як алмазні олівці (рис. 4.3), які закріплюються в спеціальній оправці.



Рисунок 4.3 – Алмазний олівець для правки абразивного круга [17]

Обкатування абразивного інструменту здійснюється за допомогою спеціальних кругів або роликів (рис. 4.4). Шліфувальні пристрої закріплюються в оправі або на осі, після чого проходить механічна обробка круга. Недоліком такого методу правки є його низька точність та пил, який утворюється через прямий контакт абразивів.



Рисунок 4.4 – Правлячий алмазний ролик [17]

Шліфування абразивного круга для відновлення його форми та зернистості являється найпростішим методом його обробки, який можна провести навіть в домашніх умовах. Для процесу механічного шліфування необхідні спеціальний інструмент та алмазні або ельборові круги (рис. 4.5). Процес відновлення поверхні круга полягає в тому, що шліфувальний інструмент проходить по всій поверхні диска, видаляючи забруднення та нерівності.



Рисунок 4.5 – Правлячий круг [17]

Правка методом накочування проводиться за допомогою точильного бруска, який видаляє нерівності і будь-які деформації абразивного круга та нагадує процес стандартного механічного шліфування, однак провести його можна тільки на спеціальному устаткуванні. Точильний брусок закріплюється на шліфувальному верстаті та під час обробки правкою частина верхнього шару абразиву зрізається, що значно покращує його поверхню. Для точіння використовують спеціальні бруски з карбіду кремнію та алмазів, які відрізняються високою міцністю і дуже ефективні як абразивний шліфувальний інструмент. Для правки накочуванням також використовується спеціальне обладнання, але такий метод підходить тільки для обробки профільних кругів. Заточування проводиться за допомогою фасонного ролика чи металевого накатного диска. При цьому може обертатися як шліфувальний інструмент, так і сам диск. Заточення таким способом дає хороші результати і відрізняється високою точністю [18], але важливо дотримуватись деяких правил і проводити накочування при дотриманні необхідної швидкості обертання.

Вибір того або іншого методу правки абразивного різального інструменту залежить від величини його зношення, наявного обладнання та необхідної точності самого інструменту.

## 4.2. Методика управління теплонапруженістю процесу абразивного оброблення

Інженерна методика керування теплонапруженістю процесу абразивного оброблення металів та їх сплавів як правило включає в себе аналіз існуючих теплових навантажень в схемі технологічної обробки та застосування технічних засобів контролю температури та впливу на неї для забезпечення стабільності обробки та уникнення теплових дефектів [19].

Пропонована методика передбачає проведення моніторингу процесу різання абразивним інструментом за температурою у зв'язці з такими режимними параметрами оброблення як швидкість заготовки та величина її припуску.

Рівень температури на глибині  $\delta$  від поверхні заготовки можна знайти за формулою (4.1) [19]:

$$T_{\delta.\max} = T_{0.\max} \left( 1 - 0,5 \sqrt{\frac{V}{ah} \cdot \delta} \right), \quad (4.1)$$

де  $T_{\delta.\max}$  – температура заготовки на глибині  $\delta$  від її поверхні;

$T_{0.\max}$  – допустиме значення температури поверхні заготовки в ході її абразивного оброблення;

$V$  – швидкість руху заготовки в зоні різання;

$\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності середовища;

$h$  – напівширина теплового джерела;

$\delta$  – глибина зняття припуску.

Функціонування системи автоматичного контролю рівня теплонапруженості процесу різання відбувається згідно алгоритму, зображеного на рисунку 4.6:

– в блоці умов встановлюється допустиме значення температури різання матеріалу залежно від його фізичних властивостей та режимних параметрів;

- відбувається порівняння реальної та допустимої температури різання;
- електричний сигнал сформований термоелектричним давачем аналізується контролером та застосовується для управління швидкістю подачі заготовки в зону різання та теплонапруженістю процесу зокрема;
- дотримання допустимої температури шліфування дає змогу стабілізувати якість абразивної обробки за рахунок системи управління теплонапруженістю процесу різання (рис. 4.7) та уникнути припиків і інших теплових дефектів.

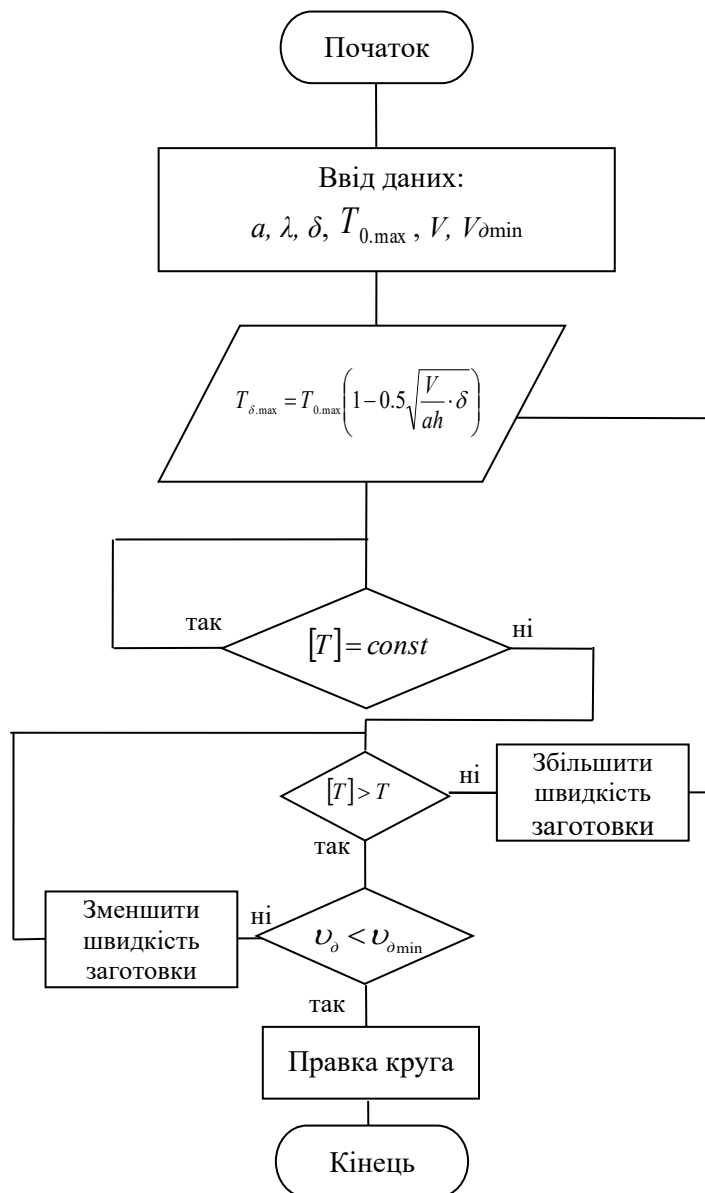


Рисунок 4.6 – Алгоритм контролю температури різання матеріалу в процесі його обробки

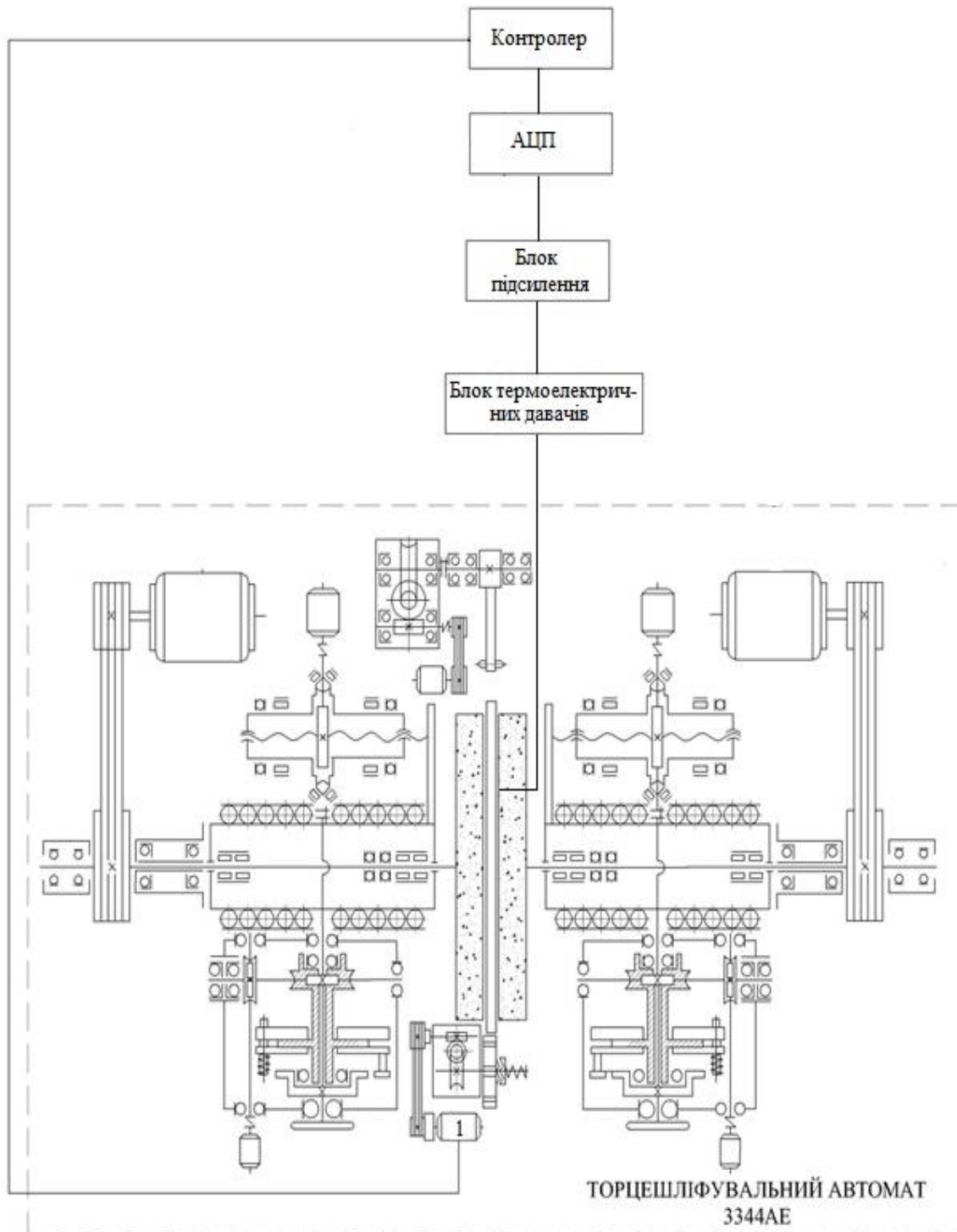


Рисунок 4.7 – Система управління теплонапруженістю процесу різання:

1 – електропривід механізму подачі деталей

Для контролю частоти обертання двигуна та швидкості подачі заготовок в зону різання пропонується застосування контролера Datakom dkg-255 mpu для управління частотою обертання двигуна та теплонапруженістю процесу механообробки деталей.

## Висновки до розділу 4

1. Шліфувальні операції повинні проводитись з обов'язковим балансуванням різального інструменту та правкою, що гарантує отримання якісної поверхні та захищає вузли шліфувальних верстатів від передчасного пошкодження та виходу з ладу. Особливу увагу балансуванню різального інструменту необхідно приділяти на операціях переривчастого шліфування, при якому застосовуються абразивні круги з канавками, що призводить до появи значних дизбалансів таких інструментів.

2. Обов'язковому балансуванню підлягають абразивні круги діаметром від 100 мм із застосуванням статичних та динамічних методів. Динамічні методи балансування дають можливість проводити налагодження різального інструменту в ході його експлуатації та можливість автоматизації процесу. Постійне слідкування за коливанням дизбалансу абразивного круга та повна автоматизація процесу балансування забезпечує високу якість оброблюваної поверхні.

3. Правка абразивного різального інструменту є важливим етапом в процесі утворення якісного поверхневого шару оброблюваного матеріалу та може бути забезпечена такими операціями як обточування, обкатування, накатування та шліфування. Вибір методу правки залежить від форми різального інструменту та вимог які висуваються до нього та оброблюваної поверхні. Якісно проведені балансування та правка різального інструменту забезпечують належний рівень шорсткості поверхні матеріалу та сприяють покращенню його експлуатаційних властивостей.

4. Забезпечення якісного поверхневого шару з відсутніми тепловими дефектами можливо досягти шляхом контролю теплонапруженості процесу різання безпосередньо в ході обробки заготовок, оскільки припуск на обробку та стан поверхні різального інструменту є малопрогнозованими параметрами які безпосередньо визначають температуру в зоні різання. Пропонується проводити тепловий моніторинг процесу різання матеріалу безпосередньо в ході його

обробки та за його станом проводити керований вплив на швидкість заготовок та правку різального інструменту по мірі його затуплення та засолення. Наведені алгоритм та методика керування теплонапруженістю процесу оброблення кілець підшипників на торцешліфувальних автоматах, що дасть змогу підвищити ефективність їх оброблення.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз наявних способів дослідження температури переривчастого абразивного оброблення металевих конструкційних матеріалів. Дослідження теплонапруженості процесів механообробки за допомогою експериментальних методів є найбільш достовірним методом визначення реальної температури в зоні різання, який дає змогу встановити істинні значення контактних температур, що практично неможливо за теоретичних методів дослідження, оскільки вони не враховують всі наявні фактори впливу через спрощення реальних моделей, відсутності реальних емпіричних даних. Термоелектричні методи термометрії дають можливість реалізовувати вимірювання в діапазоні від  $-50$  до  $+1500$  °С, формують на виході аналоговий електричний сигнал та можливість дистанційної передачі з подальшим інтегруванням у цифрові системи обробки інформації.

2. Проведено моделювання температури різання процесу переривчастого абразивного оброблення. Змінність теплового потоку процесу переривчастого шліфування та невизначеність кількості джерел тепла зумовлених різнорозмірністю абразивних зерен в сукупності з іншими впливовими факторами не дають повної достовірності існуючих математичних моделей теплового моніторингу процесу механообробки переривчастим абразивним інструментом, що зумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень контактних температур різання металів.

3. Проведено розробку вимірювальної системи дослідження температури при переривчастому шліфуванні побудованої на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та його цифровізацію. Використання мікроконтролера, ізотермічного блоку та оптоелектронного блоку дають змогу проводити обробку інформації, можливість дистанційної передачі та підвищення її точності.

4. Проведено дослідження контактних температур процесу переривчастого абразивного оброблення. Експериментальні дослідження температури металів

при механообробці доцільно проводити з використанням контактних методів вимірювання термоелектричними або терморезистивними перетворювачами температури. Застосування безконтактних методів вимірювання температури є малоефективним через закритість зони різання, особливо при шліфуванні абразивними кругами торцем інструменту та меншою точністю. Проведено визначення температура шліфування підшипникової сталі методом закладної термопари в ході її обробки. Дослідження значення температури при абразивній обробці від таких факторів як  $V_{кр}$ ,  $V_d$  та  $t$  для сталі ШХ15 показало, що для усіх застосовуваних режимах різання температура в зоні контакту менша при переривчастому шліфуванні, а різниця температур більша при інтенсифікації режимів обробки. Зменшення швидкості абразивного круга негативно відображається на шорсткості поверхні матеріалу, тому основними технологічним факторами впливу на теплонапруженість процесу абразивного оброблення є швидкість подачі заготовки та величина припуску, який знімається в ході обробки матеріалу. Температура при абразивній переривчастій обробці для пропонованої конструкції переривчастого інструменту в середньому на 30% менша у порівнянні з традиційним абразивним обробленням суцільним кругом та дозволяє проводити інтенсифікацію режимних параметрів процесу різання та уникнути теплових дефектів, таких як припіки та мікротріщини.

5. Досліджено особливості правки та балансування різального інструменту та їх вплив на точність і надійність процесу абразивного оброблення. Шліфувальні операції повинні проводитись з обов'язковим балансуванням різального інструменту та правкою, що гарантує отримання якісної поверхні та захищає вузли шліфувальних верстатів від передчасного пошкодження та виходу з ладу. Особливу увагу балансуванню різального інструменту необхідно приділяти на операціях переривчастого шліфування, при якому застосовуються абразивні круги з канавками, що призводить до появи значних дизбалансів таких інструментів. Обов'язковому балансуванню підлягають абразивні круги діаметром від 100 мм із застосуванням статичних та динамічних методів. Динамічні методи балансування дають можливість проводити налагодження

різального інструменту в ході його експлуатації та можливість автоматизації процесу, що забезпечує високу якість обробки. Правка абразивного інструменту є важливим етапом в процесі утворення якісного поверхневого шару оброблюваного матеріалу та може бути забезпечена такими операціями як обточування, обкатування, накатування та шліфування. Вибір методу правки залежить від форми різального інструменту та вимог які висуваються до нього та оброблюваної поверхні. Якісно проведені балансування та правка різального інструменту забезпечують належний рівень шорсткості поверхні матеріалу та сприяють покращенню його експлуатаційних властивостей.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сьох О. М., Пташенчук В. В. Формування та дослідження мікрогеометрії торців кілець підшипників. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 114-115.
2. Пташенчук В. В., Васькевич В. О. Дослідження мікротвердості залізовуглецевих сплавів сформованих в середовищі швидкозмінного температурного поля. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 101.
3. Теплові процеси при звичайному та переривчастому шліфуванні : навчальний посібник / Якімов А. В. та інші. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/11156> (дата звернення: 12.10.2025).
4. Температура макро- і мікропереривчастого шліфування. URL: <https://bornik.college.ks.ua/downloads/sbornik4/pdf/2.pdf> (дата звернення: 09.09.2025).
5. Визначення температури переривчастого шліфування. URL: <https://old-pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1363780078.pdf> (дата звернення: 09.09.2025).
6. Дослідження впливу режимів шліфування та параметрів переривчастого шліфувального круга на температуру шліфування кілець роликотпідшипників. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal/uk/article/view/856> (дата звернення: 09.09.2025).
7. Новіков Ф. В. Оптимальні рішення в технологіях механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛПРА, 2024. 360 с.
8. Защепкіна Н. М. Метрологія : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
9. Якімов А. В. Переривчасте шліфування : навч. посіб. Київ - Одеса: Вища школа. URL: <https://k.twirpx.link/file/876995/> (дата звернення: 12.10.2025).

10. Сипайлов В. А. Теплові процеси під час шліфування та керування якістю поверхні. URL: <https://maxbook.kiev.ua/ua/p2643772006-sipajlov-teplovye-protsessy.html> (дата звернення: 14.10.2025).
11. Датчики температури. URL: <https://www.scribd.com/presentation/629884478> (дата звернення: 10.11.2025).
12. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : навчальний посібник. Київ: Освіта України. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/b66cac3b-a38b-45e2-8c1a-573246f366e6> (дата звернення: 12.11.2025).
13. Шейкіна Н. В., Баранник М. О., Вельма С. В. Електротехніка та основи електроніки : навчальний посібник . Харків : НФаУ, 2024. 110 с.
14. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликотішлипників методом переривчастого шліфування: монографія / Пташенчук В. В. та інші. Луцьк: Вежа-Друк. 128 с. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation\\_for\\_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation_for_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC) (дата звернення: 14.11.2025).
15. Встановлення, балансування та правка абразивного шліфувального круга під час використання. URL: <https://ua.esabrasives.com/news/grinding-wheel-71797570.html> (дата звернення: 17.11.2025).
16. Дослідження процесів балансування шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатів з урахуванням невірноваженості різального інструменту. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/233406/232154> (дата звернення: 19.11.2025).
17. Правлячі алмазні інструменти. URL: <https://www.almaz-inst.com/catalog/i-pravlyachyu-almaznyu-instrument> (дата звернення: 20.11.2025).
18. Назаренко І. І., Ручинський М. М., Дєдов О. П. Технологія машинобудування : навчальний посібник. Київ, 2024. 164 с.
19. Ptachenchuk, V., Denysiuk, V., Lapchenko, Y., Symoniuk, V., Reshetylo, O. (2025). Automated Control System Qualities of Roller Bearings in Butt End Grinding Operations. In: Ivanov, V., Silva, F.J.G., Trojanowska, J., Pinto, A.M.G.

(eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. pp. 219-228.

20. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.