

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістр*

на тему: «Забезпечення експлуатаційних властивостей деталей  
сільськогосподарських машин через прогнозування та  
контроль хвилястості при механічній обробці»

КРМ.133ГМмд(ОНП)\_21.06.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за міждисциплінарною освітньо-  
науковою програмою  
*«Сервісна інженерія в агро-  
промисловому виробництві»*  
спеціальностей 133 «Галузеве  
машинобудування», 208 «Агроінженерія»  
ступеня вищої освіти *магістр*  
групи 133ГМмд(ОНП)\_21  
ГАРЬКАВЕНКО Віктор

Керівник: докт. техн. наук, професор  
ЗУБКО Владислав

**Полтава – 2026 року**

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний  
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма  
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»  
Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»  
Ступінь вищої освіти *магістр*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри механічної  
та електричної інженерії,  
канд. техн. наук, доцент,  
\_\_\_\_\_ Станіслав ПОПОВ  
30 червня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

**ГАРЬКАВЕНКО Віктор**

1. Тема роботи: *«Забезпечення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарських машин через прогнозування та контроль хвилястості при механічній обробці»*,  
керівник роботи *докт. техн. наук, доцент ВЕТОХІН Володимир*,  
затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

*Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.*

*Розділ 2. Методика досліджень.*

*Розділ 3. Результати експериментів.*

*Розділ 4. Практична реалізація розробок.*

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титольний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25	
3	Опрацювання літературних джерел	15.12-28.12.25	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	18.05-20.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Віктор ГАРЬКАВЕНКО  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Володимир ВЕТОХІН  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка:** 4 розділи, 31 рисунок, 7 таблиць, 20 використаних джерел, 75 сторінок. **Ілюстраційна частина:** 11 слайдів.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес механічної обробки деталей сільськогосподарських машин.

**Предмет дослідження** – закономірності формування хвилястості поверхні, методи її прогнозування та контролю, а також залежність параметрів хвилястості від режимів фрезерування.

**Встановлення актуальної технічної задачі** – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

**Мета кваліфікаційної роботи магістра** – забезпечення підвищених експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарських машин через прогнозування та контроль хвилястості поверхонь під час механічної обробки, а також вибору оптимальних режимів різання для отримання стабільних параметрів якості.

**Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра** – надання рекомендацій стосовно удосконалення деталей машин і обладнання агропромислового виробництва.

У **першому розділі** проведено всебічний аналіз існуючих досліджень щодо геометричних параметрів поверхні та факторів, що впливають на утворення хвилястості. Показано, що хвилястість суттєво визначає експлуатаційні властивості деталей, але її параметри залишаються недостатньо стандартизованими й вивченими.

**Другий розділ** викладає методикау отримання частотних характеристик технологічної системи та алгоритм її ідентифікації. Підхід дозволяє визначати динамічні параметри процесу обробки та закладати основу для точного прогнозування хвилястості.

У **третьому розділі** наведено результати експериментів, спрямованих на дослідження хвилястості поверхонь при циліндричному фрезеруванні. Отримані експериментальні криві та передаточні функції дають змогу оцінити реальний стан технологічної системи та підтверджують правильність обраної методики.

**Четвертий розділ** представляє практичну реалізацію розробок, зокрема рекомендації щодо безпечної роботи, економічні розрахунки та оцінку екологічних аспектів фрезерування. Показано, що впровадження оптимізованих режимів різання має як економічний, так і екологічний ефект.

**Практичні результати роботи** – проведено автоматизацію системи дослідження хвилястості та отримано частотні характеристики фрезерної операції, що дозволило побудувати її передаточну функцію. Встановлено вплив режимів різання на частотні властивості процесу та розроблено залежності, які дають можливість прогнозувати хвилястість обробленої поверхні. Практичне

впровадження запропонованих рішень забезпечило підвищення точності обробки, стабільність технологічного процесу та економічний ефект.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи** – результати роботи рекомендовано до використання на підприємствах сервісу та сільськогосподарського машинобудування.

**Сфера застосування результатів роботи** – виробничі підприємства машинобудівної галузі, агротехнічні сервісні центри, науково-дослідні та проектно-конструкторські організації.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою відповідного сервісу та є оригінальним.

#### АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено закономірності формування хвилястості оброблених поверхонь деталей сільськогосподарських машин та її вплив на експлуатаційні властивості. Проаналізовано технологічні фактори, що визначають появу хвилястості, а також динамічні процеси, які виникають під час лезової та абразивної обробки. Запропоновано методику отримання частотних характеристик технологічної системи та алгоритм її ідентифікації для подальшого прогнозування хвилястого профілю. Проведені експериментальні дослідження дозволили побудувати передаточні функції операції фрезерування та оцінити реальний вплив коливань на якість поверхні. Практична частина роботи містить рекомендації щодо оптимізації режимів різання, підвищення безпеки праці та економічної ефективності виробництва. Результати можуть бути використані для підвищення надійності, довговічності та ресурсу деталей машин.

**ХВИЛЯСТІСТЬ ПОВЕРХНІ, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА, ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПЕРЕДАТОЧНА ФУНКЦІЯ, ФРЕЗЕРУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА**

#### ANNOTATION

The study investigates the formation mechanisms of waviness on machined surfaces of agricultural machinery parts and its impact on their operational performance. The technological factors influencing waviness and the dynamic processes occurring during cutting and abrasive machining are analyzed. A methodology for obtaining frequency characteristics and an identification algorithm for the technological system are proposed to enable prediction of the waviness profile. Experimental results allowed the development of transfer functions for milling operations and assessment of vibration effects on surface quality. The practical section provides recommendations for optimizing cutting modes, improving workplace safety, and increasing production efficiency. The findings can be applied to enhance the reliability, durability, and service life of machine components.

**SURFACE WAVINESS, MACHINING, FREQUENCY CHARACTERISTICS, TRANSFER FUNCTION, MILLING, TECHNOLOGICAL SYSTEM**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	8
1.1 Геометричні параметри якості оброблених поверхонь .....	8
1.2 Вплив хвилястості на експлуатаційні властивості .....	15
1.3 Технологічні фактори, що визначають поверхневі періодичні нерівності обробленої поверхні .....	22
1.4 Прогнозування хвилястості обробленої поверхні методами математичного моделювання .....	34
Висновки до розділу 1 .....	37
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	38
2.1 Отримання частотних характеристик операції механічної обробки .....	38
2.2 Алгоритм ідентифікації операції механічної обробки .....	45
Висновки до розділу 2 .....	47
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ .....	49
3.1 Автоматизована система дослідження хвилястості обробленої поверхні .....	49
3.2 Побудова передаточної функції операції циліндричного фрезерування .....	55
Висновки до розділу 3 .....	56
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК .....	68
4.1 Безпека робіт під час фрезерування .....	68
4.2 Розрахунок економічного ефекту .....	70
4.3 Екологічна безпека при фрезеруванні .....	71
Висновки до розділу 4 .....	73
ВИСНОВКИ .....	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	76

## ВСТУП

Сучасне агропромислове виробництво характеризується високим рівнем механізації та широким використанням машин і знарядь, ефективність роботи яких безпосередньо залежить від надійності, довговічності та точності виготовлення деталей. Функціонування сільськогосподарської техніки відбувається в умовах підвищених навантажень, абразивного середовища та змінних режимів роботи, що зумовлює підвищені вимоги до якості поверхонь деталей, їх експлуатаційних властивостей та стійкості до зносу. Одним із ключових параметрів, що визначає невтомність, триботехнічні характеристики та працездатність деталей, є хвилястість, яка формується у процесі механічної обробки та суттєво впливає на умови контактування поверхонь.

У практиці сервісної інженерії важливим завданням є не лише відновлення та підтримання роботоздатності техніки, а й забезпечення відповідності технологічних процесів чинним вимогам щодо точності та якості. Контроль геометричних параметрів поверхні, зокрема хвилястості, дозволяє прогнозувати експлуатаційну поведінку деталей, запобігати передчасному зносу та оптимізувати режими механічної обробки. Використання методів прогнозування та технологічного контролю у поєднанні з аналізом впливу режимів різання забезпечує можливість цілеспрямованого регулювання якості поверхонь та отримання стабільних результатів при виготовленні та ремонті деталей сільськогосподарських машин.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення експлуатаційної надійності техніки через удосконалення параметрів механічної обробки та впровадження методів технологічного контролю хвилястості. Це дозволяє зменшити витрати на ремонт і обслуговування машин, підвищити ефективність їх роботи та продовжити ресурс деталей, що є важливими завданнями для фахівців освітньої програми «Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві».

**Метою роботи** є забезпечення підвищених експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарських машин через прогнозування та контроль хвилястості поверхонь під час механічної обробки, а також вибору оптимальних режимів різання для отримання стабільних параметрів якості.

**Об'єктом** дослідження є технологічний процес механічної обробки деталей сільськогосподарських машин, а **предметом** – закономірності формування хвилястості поверхні, методи її прогнозування та контролю, а також залежність параметрів хвилястості від режимів фрезерування.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких **завдань**.

1. Проаналізувати експлуатаційні умови роботи деталей сільськогосподарських машин та їх залежність від параметрів поверхневого шару, зокрема хвилястості. Дослідити формування хвилястості при механічній обробці та визначити фактори, що впливають на її величину.

2. Розробити або обґрунтувати методикку прогнозування хвилястості в умовах фрезерування деталей.

3. Обрати раціональні режими механічної обробки, які забезпечують мінімізацію хвилястості та стабілізацію якості поверхонь.

4. Розробити заходи щодо підвищення безпеки робіт при фрезеруванні в умовах виробництва. Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження оптимізованих режимів обробки та оцінити екологічні аспекти механічної обробки та вплив запропонованих технологічних рішень на зменшення шкідливих викидів та відходів.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Геометричні параметри якості оброблених поверхонь

Під якістю поверхонь деталей мають на увазі сукупність всіх характеристик, що впливають на їх працездатність протягом всього строку служби. Якість поверхонь деталей багато в чому визначає експлуатаційні характеристики машин і механізмів.

Поверхневим шаром називають зовнішній шар деталі, що має макро- і мікровідхилення від ідеальної геометричної форми і змінені фізико-хімічні властивості порівняно з властивостями основного матеріалу (рисунок 1.1) [1-3].

Рисунок 1.1 – Поверхневий шар деталі:

- 1 – макровідхилення; 2 – хвилястість; 3 – шорсткість; 4 – субшорсткість;
- 5 – адсорбована зона; 6 – зона оксидів; 7 – гранична зона матеріалу;
- 8 – зона матеріалу із зміненими фізико-хімічними властивостями

Відповідно до уявлень про життєвий цикл виробу [2] процес формування поверхневого шару будь-якої деталі машини здійснюється в процесі її виробництва і продовжує змінюватися в процесі її експлуатації. Дійсно, при розгляді питання якості обробленої поверхні, в першу чергу вирішують завдання поліпшення експлуатаційних характеристик деталі протягом усього терміну її служби. У процесі експлуатації будь-якої металевої деталі машини, в залежності від призначення, її поверхневий шар відчуває вплив термічних, механічних, фізичних і хімічних впливів, що однозначно призводить до зміни параметрів якості.

До показників, які характеризують якість поверхні деталі, відносять геометричні параметри, фізико-механічні та хімічні властивості [3]. На рисунку 1.2 наведена класифікація основних параметрів, що характеризують поверхню деталі.

Рисунок 1.2 – Показники якості поверхні деталі

Знання параметрів, що характеризують якість поверхневого шару деталей, зумовлено необхідністю їх забезпечення у процесі виготовлення та експлуатації деталей. Конструктор вказує на кресленні значення параметрів точності та шорсткості для кожної поверхні у відповідності з її службовим призначенням і терміном експлуатації. При виготовленні деталі як би створюється запас за цими параметрами, що забезпечує певний період її експлуатації. При виконанні технологічного процесу технологу необхідно забезпечити ці параметри, а по закінченню періоду експлуатації проводиться або відновлення, або утилізація деталі.

Оцінка параметрів якості реальної поверхні деталі здійснюється у процесі дослідження її поверхневого шару. За даними літературних джерел [4, 5] зміна властивостей і структури поверхневого шару обробленої деталі відбувається не тільки ззовні, але і за глибиною на відстані від десятків нангстрем до десятків часток міліметра, рідко – до двох міліметрів. Глибинні зміни поверхні деталі, що призводять до появи в об'ємі одного виробу (від поверхні до серцевини) ділянок, що мають різні структуру і властивості, є наслідком фізико-хіміко-механічних впливів. Серед основних причин, що впливають на зміну параметрів поверхневого шару, виділяють:

- відмінність у стані атомів металу у поверхневого шару зі станом атомів, що знаходяться в об'ємі виробу, наслідком чого є вільна поверхнева енергія і велика адсорбційна активність;

- сумарний вплив механічних, теплових і фізико-хімічних дій на поверхню металу при остаточних і попередніх операціях технологічної обробки;

- сумарний вплив повторних циліндричних, механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу при навантаженні тертям при експлуатації.

Металева поверхня деталі, що зазнала операцій остаточної (фінішної) обробки, володіє високою адсорбуючою здатністю, що призводить при взаємодії з газоподібним чи рідким середовищем до поглинання атомів і молекул середовища і накопичення їх у тонких поверхневих шарах до прямих хімічних реакцій, при цьому процес хімічної адсорбції носить незворотній характер.

Аналіз поверхні деталі на предмет визначення її якості полягає не тільки в дослідженні хімічного складу тонких поверхневих шарів, але і у вивченні структурних змін, що призводять до утворення змінення (наклепу) і залишкових напружень, безперечно впливаючих на експлуатаційні характеристики деталі.

Серед негативних наслідків зміни фізико-хіміко-механічних властивостей поверхневих шарів обробленої деталі, що величають на її працездатність, виділяють прояв неприпустимих видів зносу, передчасний розвиток втоми, перехід до аварійного стану.

Роль вихідних механічних, фізичних і хімічних властивостей поверхневого шару металу деталі, що формується в процесі технологічної обробки і подальшої експлуатації, надзвичайно велика, проте серед показників, що визначають якість обробленої поверхні, крім інших, суттєве становище займають її геометричні параметри.

Процес виготовлення будь-якої деталі машини складається з ряду етапів, що дозволяють за допомогою засобів і методів обробки заготовки відтворити деталь максимально наближену до спроектованої конструктором, враховуючи необхідну ступінь наближення в залежності від її функціонального призначення. Одним з основних параметрів, що дозволяють об'єктивно оцінювати геометричні форми деталі, є розмір – числове значення лінійної величини (діаметр, довжина, висота і т.

п.), що є основним показником, що характеризує її точність. Визначення значень номінального та граничних розмірів здійснюється на етапі проектування і підготовки конструкторського креслення виробу шляхом виконання кінематичних, динамічних і міцнісних розрахунків з урахуванням конструктивних, технологічних, естетичних і інших умов, що формуються в залежності від застосування самого виробу. Отриманий таким чином номінальний розмір обов'язково округляється і тільки після цього вказується на робочому кресленні деталі. Визначення значень дійсних розмірів деталі здійснюється безпосереднім вимірюванням за допомогою вимірювальних інструментів або іншим способом з похибкою, притаманною вживаному обладнанню.

Питання оцінки геометрії деталі шляхом проведення вимірювань достатньо вивчене. Даний факт підтверджується наявністю як наукових досліджень, так і стандартів, що встановлюють чіткі критерії і поняття в даній області. Однак для об'єктивної оцінки якості деталі одного критерію, що характеризує її розмірну частину, явно недостатньо.

Найбільш важливі експлуатаційні властивості деталей машин (зносостійкість, контактна жорсткість, щільність з'єднань і міцність посадок) значною мірою залежать від їх контактної взаємодії [6]. При дослідженні контактної взаємодії двох сполучених деталей розглядають характер контакту, зближення, фактичну площу контакту і динамічні характеристики стиків поверхонь. Процес контактної взаємодії деталей є достатньо вивченим питанням, при цьому положення дискретності контакту є загальновизнаним. Дискретність контакту сполучених деталей обумовлена наявністю геометричних відхилень їх реальної поверхні від номінальної, що приводить до зменшення фактичної площі контакту. Це, у свою чергу, призводить до зміни величини контактних напружень.

Геометрія реальної поверхні будь-якої, навіть ретельно обробленої деталі значною мірою відрізняється від ідеальної – теоретичної поверхні. Після обробки на поверхні деталі є макро- і мікронерівності різної величини.

Для опису поверхневого шару деталі в машинобудуванні прийняті наступні групи геометричних характеристик, що дозволяють здійснювати якісні методи оцінки:

- макронерівності (відхилення форми), які визначаються на всій довжині або ширині деталі;
- хвилястість, яка визначається на довжині більшій, ніж базова довжина для шорсткості;
- шорсткість, яка визначається на базовій довжині;
- субшорсткість – субмікронерівності, що накладаються на шорсткість поверхні.

На практиці найбільш часто використовуються висотні параметри шорсткості  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ . При дослідженні характеру контактування поверхонь застосовується відносна опорна довжина профілю  $t_p$ . Крокові параметри шорсткості поверхні  $S$  і  $S_m$  практично використовуються досить рідко. Необхідно звернути увагу, що всі параметри шорсткості отримують обробкою профілограми поверхні на певній базовій довжині  $l_{баз}$ , яка, в свою чергу, залежить від шорсткості. Більш того, параметри шорсткості істотно залежать від напрямку траси профілографування. Тому й розрізняють поздовжню і поперечну шорсткість. На практиці для висотних параметрів зазвичай використовують напрямки профілографування із максимальними значеннями цих параметрів. Існують і нестандартизовані параметри шорсткості (наприклад,  $R_1$ ). Крім того, в інших країнах існують свої стандарти і параметри шорсткості.

Відсутність стандартів, що характеризують хвилястість поверхні обробленої деталі, чинить безпосередній вплив на експлуатаційні властивості деталей, що знаходить підтвердження у різноманітних наукових працях і дослідженнях.

Використання макроеометричного аналізу для оцінки якості обробленої деталі необхідно для встановлення об'єктивного критерію прояви відхилень форми реальної поверхні деталі від номінальної, зображеної на кресленні. Макроеометричну оцінку проводять на всій довжині або ширині деталі. Як вже зазначалося, у діючих стандартах машинобудівної галузі відсутні чіткі вказівки і вимоги щодо визначення параметрів відхилень форми деталі, проте закріплені положення передбачають п'ять видів відхилень форми: від прямолінійності, від площинності для плоских поверхонь; від циліндричності; від круглості; від профілю поздовжнього перерізу для циліндричних поверхонь. На рисунку 1.3 наведена

структурна схема відхилень форми, які характеризують поверхню обробленої деталі на всій її довжині або ширині.

Рисунок 1.3 Види відхилень форми

Прояв відхилень форми обробленої деталі насамперед пов'язують із геометричною неточністю верстата, різницею пружних деформацій технологічної системи при обробці поверхонь, пояснюють температурними деформаціями технологічної системи в процесі обробки поверхні або зносом різального інструменту.

Серед похибок обробки хвилястість займає проміжне положення між відхиленнями форми і шорсткістю поверхні. Хвилястість являє собою сукупність періодично повторюваних височин і западин із взаємною відстанню, значно більшою, ніж у нерівностей, що утворюють шорсткість (рисунок 1.4). Фермування поняття хвилястості, що відокремлює її від інших геометричних характеристик. Це є наслідком процесу вивчення нерівностей під впливом розвитку технічних можливостей і методів вимірювань і носить досить умовний характер.

Рисунок 1.4 – Поверхня обробленої деталі при наявності хвилястості:  
а – хвильограма (1 – хвилястість; 2 – шорсткість); б – схема поверхні

Фізично обґрунтованою, а тим більше природної фізичної межі між шорсткістю і хвилястістю поверхні як сукупністю нерівностей з кроками, що перевищують базову довжину, не існує. Відсутність чіткої межі відмінностей між хвилястістю і іншими геометричними характеристиками позначилася і на стандартизації геометричних параметрів. Як вже зазначалося раніше стандартів, що повністю або частково характеризують хвилястість, на сьогоднішній день немає.

Незважаючи на відсутність стандартів, що характеризують хвилястість поверхні, для її параметричної оцінки розроблені певні рекомендації. У якості параметрів, що характеризують хвилястість, використовують максимальну висоту хвилястості  $W_{max}$ , середню висоту хвилястості по десяти точках  $W_z$ , обчислювані аналогічно параметрам  $R_{max}$  і  $R_z$  шорсткості поверхні, і середній крок хвилястості  $S_w$ , який визначається як середнє арифметичне відстані з п'яти значень між хвилями на п'яти ідентичних окремих ділянках вимірювань хвилястості (аналогічно кроку  $S_m$  для шорсткості) (рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 – Хвильограма поверхні

Однак оцінка хвилястості тільки за вказаними параметрами у ряді випадків недостатня. Більш повне параметричну оцінку хвилястості виконують за тими ж параметрами, що і шорсткість: висотним  $W_{max}$ ,  $W_a$ ,  $W_z$ ,  $W_p$ , кроковим  $S_w$ , формі нерівностей хвиль  $r_w$ , їх напрямку, опорної довжини профілю  $t_w$ . При цьому розрізняють на поверхні деталі подовжню і поперечну хвилястість. Застосування таких ретельних методів оцінки зумовлено можливим впливом хвилястості не тільки на якість обробленої поверхні, але також на її чистоту, що більшою мірою характеризується наявністю шорсткості різного рівня.

Утворення хвилястості поверхні залежить від багатьох причин і далеко не так вивчено, як утворення мікронерівностей. Цим параметром геометрії поверхні не завжди вдається керувати на практиці. Безсумнівно, роль хвилястості як геометричного параметра, що характеризує якість поверхні, має велике значення, а недостатня вивченість даної області визначає пріоритети досліджень. Необхідність подальших досліджень у даній області підкріплюється і тенденціями сучасної машинобудівної галузі, спрямованими на підвищення якості продукції шляхом поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин.

## **1.2 Вплив хвилястості на експлуатаційні властивості**

Експлуатація деталей в механізмах машин безпосередньо пов'язана з їх взаємним механічним контактом. При розгляді питань контактування прийнято досліджувати процеси, що протікають при взаємодії поверхонь двох спряжених деталей. Поверхня деталі характеризується її геометрією, а також фізико-хімічними та механічними властивостями її поверхневих шарів.

Одним з основних параметрів, що характеризують контактну взаємодію двох спряжених деталей, є фактична (справжня) площа контакту, що представляє собою суму малих ділянок фізичного контакту тіл. На формування фактичної площі контакту значний вплив має дискретність самого контакту. З огляду на той факт, що будь-яка реальна поверхня має макровідхилення, хвилястість, шорсткість і субмікрошорсткість, взаємодія спряжених деталей здійснюється не по всій

номінальній площі дотику, а в ряді ізольованих один від одного майданчиків контурного контакту, сума точок фактичного контакту всередині яких і становить площу фактичного (істинного) контакту.

Безпосередній фактичний контакт поверхонь визначає силові явища при зовнішньому терті. При цьому сила зовнішнього тертя в значною мірою характеризується фактичною площею контакту, з якою пов'язані справжні напруження локальних об'ємів поверхневих шарів, а також деформація і величина зносу. Значення ступеня дискретності контакту визначається з відношення фактичної площі контакту ( $S_f$ ) до номінальної (уявної) площі контакту ( $S_H$ ) і залежить в більшій мірі від геометричних параметрів спряжених деталей.

Більшість дослідників розглядають питання контактування поверхонь спряжених деталей [7], моделюючи їх стрижнями, пірамідами, конусами, сферами, еліпсоїдами. На рисунку 1.6 приведена класифікація впливу груп геометричних характеристик на основні експлуатаційні властивості деталей машин.

Як відомо, всі групи геометричних характеристик поверхні деталі мають ряд параметрів, що визначають їх основні критерії та класифікаційну приналежність. Безсумнівно, кожен параметр, що характеризує геометричну характеристику, може чинити або ні вплив на ті чи інші експлуатаційні властивості. Наприклад, значення параметра  $W_{\max}$  – найбільша висота хвиль (хвалісткість) – однозначно впливає на зносостійкість, контактну жорсткість, щільність (герметичність) з'єднань і не впливає на вібростійкість і міцність з'єднання з натягом, що залежать від інших параметрів (таблиця 1.1).

Рисунок 1.6 – Вплив геометричних параметрів поверхневого шару деталі на її експлуатаційні властивості

З таблиці 1.1 очевидно, що експлуатаційні властивості деталей в першу чергу залежать не тільки від шорсткості поверхні, безсумнівно, що впливає, але і від хвилястості. Наявність хвилястого профілю на обробленій деталі може стати причиною порушення режимів тертя спряжених деталей, вплинути на герметичність їх з'єднання, призведе до зародження вогнищ корозії і до іншого, що, в свою чергу, призведе до передчасного зносу деталей.

Хвилястість обробленої поверхні як параметр, що має статус «помилка обробки», робить негати́вний вплив на якість обробленої деталі, погіршуючи при цьому її експлуатаційні властивості. Даний факт підтверджується тим, що при наявності хвилястого профілю на поверхні деталі її опорна площа може зменшуватися від 5 до 10 разів у порівнянні з рівною шорсткою поверхнею або складати від 1 до 10% номінальної поверхні, зображеної на рисунку 1.7.

Зменшення опорної площі через наявність хвилястості на поверхні деталі призводить до різкого збільшення навантажень у вигляді сил, що прагнуть деформувати поверхневі шари деталі в місцях ділянок контакту. Здатність чинити опір дії таких сил називають контактною жорсткістю [3].

Таблиця 1.1 – Взаємозв'язок експлуатаційних властивостей деталей машин з геометричними характеристиками якості поверхонь

Експлуатаційні властивості	Геометричні характеристики поверхні												
	Макровідхилення		Хвилястість			Шорсткість							
	$H_{max}$	$H_p$	$W_a$	$W_{max}$	$S_w$	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$S_m$	$S$	$t_p$	$r$	$r'$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Контактна жорсткість	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0
Зносостійкість	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0
Тертя	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Втомна міцність	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+
Вібостійкість	0	0	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0
Корозійна стійкість	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+
Щільність (герметичність) з'єднань	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+
Міцність з'єднання з налягом	+	+	+	0	+	+	+	0	+	0	+	+	0
Міцність зчеплення покриттів	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+
Обтічність газами і рідинами	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примітка:

«\*» – основний вплив;

«+» – чинить вплив;

«-» – не має впливу.

а)

б)

Рисунок 1.7 – Спряження уязної ідеальної поверхні з поверхнею:

а – тільки наявність мікрорельєфу; б – хвилястість, покрита мікрорельєфом

Фізичний сенс поняття «контактна жорсткість» визначається з виразу:

$$j = p / y, \quad (1.1)$$

де  $p$  – питоме навантаження, що припадає на геометричну площу контакту;

$y$  – контактні переміщення.

Проведені дослідження [9] показують, що при первинному навантаженні контактуючих поверхонь контактна жорсткість у більшій мірі визначається поверхневою мікротвердістю. При повторних навантаженнях на неї в більшій мірі впливають геометричні параметри якості поверхні – її жорсткість і хвилястість. Тому характеристики хвилястості ( $W_z$  і  $W_p$ ) чинять більший вплив на контактні переміщення і контактну жорсткість. Автором навіть отримані аналітичні залежності для розрахунку величин контактної жорсткості і пружно-пластичних деформацій з урахуванням параметрів хвилястості поверхні.

Відповідно до рисунку 1.5 і таблиці 1.1, серед властивостей, які характеризують деталі в процесі експлуатації, більше значення мають показники зносостійкості і тертя. Як відомо, якість початкової поверхні деталі машини, отримана в ході технологічної обробки на етапах її виробництва, має характеристики, що не збігаються з характеристиками її робочого стану, що формуються в процесі експлуатації. Тому на початковому етапі експлуатації деталі (періодом припрацювання або період початкового зносу) відбуваються докорінні зміни

геометрії поверхні і фізико-хіміко-механічних властивостей тонких поверхневих шарів.

Виділення початкового етапу експлуатації деталей машин при вивченні питань тертя і зносу обумовлено інтенсивністю протікаючих процесів саме на даному етапі, при цьому період первісного припрацювання або початкового зносу впливає на весь період експлуатації деталі. До негативних явищ періоду припрацювання відносять різкі відхилення від нормальних умов роботи, небажані пошкодження поверхні, явища схоплювання та ін.

На тертя і знос поверхонь значний вплив мають саме геометричні параметри якості і особливо хвилястість поверхонь, що труться. Саме хвилястість обумовлює практично всі аспекти і характеристики явищ тертя і зносу. Наприклад, тертя і знос деталей ущільнювальних вузлів значною мірою залежать від матеріалу, шорсткості і хвилястості поверхні деталі, по якій ковзає ущільнювальне кільце [10]. Збільшення висоти хвилястості і шорсткості ущільнюваної поверхні супроводжується ростом сил тертя, причому з підвищенням робочого тиску ця залежність виражається більш різко.

У дослідженнях [11, 12] вказується, що «при зниженні висоти хвилі на поверхні спряженої деталі з 15 до 3 мкм, знос бабітових зразків зменшується більш ніж в 2,2 рази». Експериментальні дослідження проводилися на машині тертя при зворотно-поступальному русі сталевого зразка з різною хвилястістю по бабітовим зразкам.

Експлуатаційний період роботи деталей машин нерідко пов'язаний з впливом на них зовнішніх середовищ, таких як вологе атмосферне повітря, вода, змащувальні масла. Взаємодія поверхонь з цими середовищами призводить до процесу корозії і руйнування металу [13]. Авторами наголошується, що параметри корозії залежать як від середовища, в якому знаходиться поверхня, так і від властивостей самої поверхні і в першу чергу від площі її зіткнення із зовнішнім середовищем. Тому в даному випадку також велике значення набуває наявність хвилястості на поверхні деталі. Так як при менш розвиненій поверхні менше виходить і загальна площа активної поверхні деталі, на ній зменшується інтенсивність впливу агресивного середовища. До найбільш ефективних методів захисту поверхні від корозії відноситься нанесення захисних покриттів з одночасним підвищенням якості

деталей, що випускаються. Це призводить до зменшення ступеня появи геометричної похибки обробки.

Серед геометричних характеристик поверхні деталі, що чинять вплив на герметичність з'єднання, найбільш вивченим питанням є її шорсткість [14]. Як показують дослідження, величина витoku робочого середовища (вода, масло, повітря і т.д.) пропорційна  $R_z^3$ , тобто при зменшенні шорсткості контактуючих поверхонь в 2 рази величина витoku середовища зменшується у 8 разів. Безсумнівно, роль мікрорельєфу, що характеризується шорсткістю поверхні, має першорядне значення в питаннях впливу на експлуатаційні властивості деталей.

Експлуатація деталей машин пов'язана з передачею крутного моменту ( $M$ ) і осьових навантажень ( $P$ ), без взаємного проковзування спряжених деталей, характеризується міцністю посадки з натягом. У класичному вигляді, на дану експлуатаційну властивість деталі впливають діаметр ( $d$ ) і довжина ( $l$ ) спряження, коефіцієнти тертя при крученні ( $f_{кр}$ ) і осьового зсуву ( $f_{ос}$ ), натяг в з'єднанні ( $\Delta$ ). Однак методи, що виключають вплив всіх параметрів якості спряжених поверхонь, не відображають повної картини процесів, що протікають в області спряження.

Наведений опис показує, що для забезпечення експлуатаційних властивостей деталей машин значну роль відіграють геометричні параметри поверхневого шару.

Проведений аналіз класичних принципів оцінки експлуатаційних властивостей за параметрами якості деталі вказує на необхідність прогнозування параметрів хвилястості обробленої поверхні. Низька точність визначення хвилястості значно знижує ефективність цього підходу. Це пов'язане з тим, що в питаннях оцінки якості поверхні деталі домінуюче становище займає шорсткість поверхні, а хвилястості надається другорядне значення. Така розстановка пріоритетів зумовлена малою вивченістю процесів формування хвилястості, при тому що шорсткість поверхні носить стандартизований характер.

Дослідження хвилястості як чинника, що впливає на експлуатаційні властивості деталі, є актуальним напрямком. Незважаючи на різні результати досліджень, проведені у даній області, всі вони носять розрізнений характер, при цьому повноцінної систематизації таких відомостей не існує, що ще раз говорить про малу вивченість даного питання.

### 1.3 Технологічні фактори, що визначають поверхневі періодичні нерівності обробленої поверхні

Технологічний процес виготовлення деталі полягає в безпосередньому застосуванні різних методів обробки. Аналіз літератури [15] і статистичних даних машинобудівних підприємств показує, що основними видами обробки зовнішніх поверхонь є точіння, фрезерування (циліндричне і торцеве) та шліфування (плоске і кругле). На рисунку 1.8 зображено орієнтовне співвідношення цих видів обробки.

Рисунок 1.8 – Співвідношення методів механічної обробки різанням

Наведені дані дозволяють зробити висновок про те, що в теперішній час основну увагу необхідно приділяти саме токарній, фрезерній і абразивній обробкам, як методам, що мають найбільш широкую застосовність при формуванні поверхні деталі.

Як видно з наведеної діаграми (рисунок 1.8), у машинобудівній галузі переважне становище займають лезові методи обробки. Причиною цього є не тільки широкі можливості використання таких методів при обробці деталі, але і їх універсальність. У сучасному машинобудуванні, в умовах стрімкого розвитку напрямків вдосконалення металорізального обладнання, що відкривають можливості використання високошвидкісної обробки різанням, лезові методи отримали широке поширення як остаточні методи обробки, що дозволяють виготовляти поверхні високого класу точності без додаткових операцій. Велика

різноманітності металорізальних верстатів, інструментів і пристосувань до них дозволяє проводити обробку внутрішніх і зовнішніх поверхонь деталей різної форми і конфігурації. Дані обставини і визначають першочергове застосування лезових методів обробки при виготовленні деталей машин.

Незважаючи на очевидні відмінності операцій токарної та фрезерної обробки, в основу обох методів закладена ідентична схема процесу різання, що полягає в геометричному копіюванні металорізального інструменту в матеріалі оброблюваної деталі. Результатом такої дії є сформована поверхня деталі, що характеризується як геометричними параметрами, так і фізико-хіміко-механічними властивостями поверхневих шарів.

Дійсно, ідеалізовані підходи щодо розуміння етапів формування поверхні деталі, геометричні параметри поверхні деталі, мають ідентичний характер з геометрією металорізального інструменту, на практиці не знаходять підтвердження, так як реальний процес різання є системою, яка піддається впливу значної кількості факторів, у тому числі носять випадковий характер.

Аналіз літератури [16, 17] показує, що на параметри, які характеризують поверхню деталі, що зазнала лезових методів обробки, впливають:

- геометричні параметри інструменту і матеріал його ріжучої частини;
- режими різання;
- фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу;
- властивості обладнання, пристосувань тощо;
- вихідні параметри самої заготовки (шорсткість, хвилястість, точність).

Ступінь впливу кожного фактора на формування поверхні деталі докладно досліджена в роботах [18, 19]. Автором проведені дослідження теоретичних залежностей з розрахунку параметрів якості поверхневого шару деталей, що дозволяють встановити взаємозв'язки геометричних параметрів поверхні деталі з умовами їх лезової обробки (таблиця 1.2).

Наведені дані показують, що основний вплив на формування хвилястості обробленої поверхні надає:

- глибина різання;
- величина переднього кута ріжучого інструменту;

- жорсткість технологічної системи;
- точність верстата;
- межа плинності матеріалу заготовки;
- вихідна хвилястість поверхні заготовки.

Очевидно, що перераховані вище умови обробки визначають параметричні складові хвилястості, в той час як вид хвилястого профілю визначається застосуванням методом обробки.

На рисунку 1.9 наведено приклад формування хвилястості на циліндричній поверхні при зовнішньому точінні, а на рисунку 1.10 – схема формування хвилястості на поверхні деталі при фрезеруванні площини дисковими фрезами.

Операції фрезерування дисковими фрезами являють собою процес, спрямований на надання форми деталі, близько наближеної за своїми параметрами до еталонної, зображеної на кресленні, шляхом зрізання поверхневих шарів оброблюваної заготовки за допомогою застосування металорізального обладнання, інструмента, а також пристосовань, головними рухами яких є обертовий рух металорізального інструмента та поступальний рух оброблюваної поверхні заготовки.

Рисунок 1.9 – Утворення хвилястості на поверхні деталі при точінні

Таблиця 1.2 – Взаємозв'язок геометричних параметрів поверхневого шару деталей машин з умовами їх лезової обробки

Умови обробки	Параметри якості поверхневого шару деталей машин						
	$H_{\max}$	$W_z$	$S_{mw}$	$R_a$	$R_p$	$S_m$	$S$
1	2	3	4	5	6	7	8
Подача:							
$S \leq 0,08$ мм/об;	0	0	0	0	-	0	0
$S \geq 0,08$ мм/об	+	+	-	+	+	+	+
Швидкість різання:							
$V \leq 30$ м/хв;	0	+	-	+	+	0	-
$V \geq 30$ м/хв	0	-	-	-	-	0	+
Глибина різання, $t$	+	+	+	+	+	0	0
Кути в плані:							
$\varphi$ ;	-	-	0	*	+	0	+
$\varphi_1$	0	0	0	0	0	0	0
Передній кут:							
$\gamma > 0$ ;	+	*	0	+	+	0	-
$\gamma < 0$	+	+	+	+	+	0	+
Радіус вершини, $r$	+	+	0	*	-	0	-
Радіус різальної кромки, $\rho$	+	+	0	+	+	0	-
Шорсткість різальної кромки, $R_{zH}$	0	0	0	+	+	0	-
Жорсткість технологічної системи, $j_{TC}$	*	*	*	-	-	+	+
Точність верстата	*	*	*	-	-	0	0

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Відхилення твердості заготовок, $\Delta HB$	+	+	+	+	+	0	0
Межа текучості заготовки, $\sigma_T$	+	+*	+*	-	-	0	-
Молекулярна спорідненість матеріалу інструмента із заготовкою, $\tau$	+*	+	0	-	-	-	-
Змащення	-	-	0	-	-	-	-
Початкові параметри заготовки:							
точність	-*	-	-	0	0	0	0
хвилястість;	+	+*	+*	0	0	0	0
шорсткість	0	+	+	+	+	+	+

Примітка:

«+» – збільшення або зменшення цього параметра сприяє збільшенню або зменшенню відповідного параметра якості деталі;

«-» – збільшення або зменшення цього параметра сприяє збільшенню або зменшенню відповідного параметра якості деталі;

«\*» – даний параметр робить основний вплив на відповідний параметр якості деталі;

«0» – зміна цієї умови соробки не впливає на певні параметри якості поверхні.

Рисунок 1.10 – Кінематична схема утворення хвилястості на поверхні деталі при фрезеруванні дисковими фрезами

Загальні принципи формування поверхні при обробці фрезеруванням дисковими фрезами значною мірою збігаються з принципами утворення поверхні при плоскому шліфуванні периферією круга (рисунок 1.11). Відмінністю у порівнянні цих методів є те, що основною причиною утворення хвилястості обробленої поверхні при фрезеруванні є переривчастий характер різання окремими зубцями фрези, а при шліфуванні – вібрації, тобто коливання центру обертання шліфувального круга.

Рисунок 1.11 – Плоске шліфування периферією круга

Методи алмазно-абразивної обробки при виробництві деталей машин поступаються в загальному обсязі застосуванню методів лезової обробки. Проте шліфування виділяють як найбільш універсальний метод остаточної (фінішної) обробки гізних поверхонь деталей машин, до яких пред'являються високі вимоги щодо точності розмірів, правильності геометричної форми та шорсткості обробленої поверхні. Крім того, при обробці загартованих поверхонь використання лезових операцій часто виявляється неефективним або взагалі неможливим.

Незважаючи на очевидні відмінності процесу шліфування від обробки із застосуванням лезового інструменту, в основу обох способів закладений первинний фактор, що має ідентичний характер. У всіх випадках різання є послідовним зсувом (або сколюванням) окремих елементів – стружок за допомогою клина, до якого прикладена певна сила різання. Однак процес шліфування має ряд відмітних особливостей.

До основних ознак, притаманним саме цьому виду обробки, відносять:

- особливості застосовуваного інструмента – шліфувального круга (хаотичне розташування величезної кількості дрібних зерен на робочій поверхні; переривчаста ріжуча кромка; різномисотність та різноманіття форм шліфувальних зерен; особливі властивості шліфувальних зерен – висока твердість, термостійкість, гострота, крихкість і ін.);

- особливості процесу різання – шліфування (високі колеси швидкості мікрорізання і малі глибини різання кожним шліфуючим зерном, що забезпечує миттєве зняття величезної кількості стружок в одиницю часу та інтенсивне ковзання з матеріалом в момент, що передує їх врізанню і початку мікрорізання; високі швидкості обертання шліфувального круга – до 50 м/с і рідше до 100 м/с; високі значення температури в зоні різання та ін.).

Одним з ключових положень, що пояснюють застосування методів алмазно-абразивної обробки, є підвищення якості обробленої поверхні, що характеризується в тому числі, і її геометрією, яка прагне до номінальної геометрії поверхні, зображеної на кресленні. Поява хвилястого профілю поверхні деталі, що зазнала операції шліфування, носить явно негативний характер і не відповідає основній меті застосування таких методів обробки.

Порівняльний аналіз факторів, що впливають на геометричні параметри поверхні обробленої деталі при лезовій та алмазно-абразивній обробці, показує їх значну ідентичність. Ступінь впливу параметрів алмазно-абразивної обробки на геометричні параметри якості обробленої поверхні визначаються відповідно до таблиці 1.3.

Аналіз наведених даних показує, що утворення хвилястого профілю на поверхні, що зазнала операції шліфування, зумовлює безліч груп факторів, що мають різну природу походження. Однак особливу увагу слід приділити таким параметрам, як:

- параметри режиму різання;
- характеристики металорізального інструмента;
- параметри та властивості технологічного обладнання;
- характеристики оброблюваної заготовки і деталі.

Саме ці параметри мають максимальний первинний вплив на процеси, що сприяють утворенню хвилястості при застосуванні методів алмазно-абразивної обробки. Однак цей же комплекс параметрів впливає і на хвилястість обробленої поверхні при лезовій обробці (рисунок 1.12). Літературні дані показують, що є спільність факторів, які визначають появу хвилястості на поверхні обробленої деталі. Проте є і деякі відмінності у причинах формування хвилястості (таблиця 1.4).

Таким чином, є як загальні причини утворення хвилястості обробленої поверхні, так і відмінності у механізмі її формування. Фактична хвилястість з'являється в результаті нестабільності параметрів технологічної системи в процесі обробки, яка природним чином призводить до видозміни нормальних умов протікання процесів усередині таких систем. Так, при точінні зовнішньої циліндричної поверхні, крім головного обертового руху деталі та поступального руху подачі інструмента, внаслідок виникнення збурюючих сил, викликаних нестабільністю технологічної системи, мають місце лінійні гармонійні коливання інструмента в радіальному напрямку до оброблюваної поверхні деталі, що призводять до утворення поздовжньої і поперечної хвилястості. При цьому вказане положення має справедливий характер для методів як лезової, так і алмазно-абразивної обробки.

Таблиця 1.3 – Взаємозв'язок геометричних параметрів поверхневого шару деталей машин з умовами їх алмазно-абразивної обробки

Умови обробки	Параметри якості поверхневого шару деталей машин						
	$H_{\max}$	$W_z$	$S_{mw}$	$R_a$	$R_p$	$S_m$	$S$
1	2	3	4	5	6	7	8
Колова або лінійна швидкість деталі, $V_c$	+	+	+	+	+	+	+
Подача, $S$	+	+	+	+	+	+	+
Глибина різання, $t$	+	+	+	+	+	+	+
Число виходжувань, $N$	-	-	-	-	-	-	-
Зернистість	-	-	+	+	+	+	+
Концентрація	-	+	-	-	-	-	-
Молекулярна спорідненість матеріалу інструмента із заготовкою, $\tau$	+	+	+	-	-	-	-
Правка круга	-	-	-	-	-	-	-
Жорсткість технологічної системи, $j_{tc}$	-	-	-	-	-	0	0
Межа текучості заготовки, $\sigma_T$	+	+	+	-	-	0	-
Відхилення твердості заготовок, $\Delta HB$	+	+	+	+	+	0	0
Змащення	-	-	-	-	-	-	-
Точність верстата	-	-	-	-	-	-	-

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Початкові параметри заготовки:							
точність;	-*	-	-	0	0	0	0
хвилястість;	+	+	+	0	0	0	0
жорсткість	0	+	+	+	+	+	0
ступінь наклепу	+	+	+	0	0	0	0

Примітка:

«+» – збільшення або зменшення цього параметра сприяє збільшенню або зменшенню відповідного параметра якості деталі;

«-» – збільшення або зменшення цього параметра сприяє збільшенню або зменшенню відповідного параметра якості деталі;

«\*» – даний параметр робить основний вплив на відповідний параметр якості деталі;

«0» – зміна цієї умови обробки не впливає на певні параметри якості поверхні.

У загальному випадку процес утворення хвилястості можна представити у вигляді сумарної прояви декількох рухів: обертального ( $\omega$ ), поступального ( $S$ ) і коливального ( $v$ ), діючого в радіальному напрямкові деталі (рисунки 1.9, 1.10).

Таблиця 1.4 – Фактори, що чинять основний вплив на формування хвилястості, з урахуванням застосовуваного методу обробки

№ з.п.	Фактор	Методи обробки	
		лезової	алмазно-абразивної
1	Глибина різання	+	+
2	Жорсткість технологічної системи	+	+
3	Точність верстата	+	+
4	Початкова хвилястість	+	+
5	Число виходжувачів	-	+
6	Правка круга	-	+
7	Величина переднього кута $P_1$	+	-
8	Межа текучості матеріалу заготовки	+	-

Рисунок 1.12 – Фактори, що визначають появу хвилястого профілю на поверхні деталі, що оброблюється

Джерелами коливальних рухів, що носять вимушений характер, можуть виступати:

- дисбаланс обертових частин (шліфувальний круг, ротор електродвигуна, шків та т.д.);
- неточність роботи зубчастих зачеплень;
- підвищений знос деталей верстата;
- поштовхи зубів фрези;
- вібрації, що передаються від працюючих сусідніх верстатів і т.д.

При цьому необхідно враховувати і той факт, що в якості джерела вимушених коливань може виступати і сумарна дія кількох джерел таких коливань, в цьому випадку результуюча частота власних коливань технологічної системи буде мати близьке значення до частоти коливань найбільш сильного джерела, а фактичне значення частоти відповідатиме діапазону 150-900 Гц.

Процес утворення хвилястості на поверхні обробленої деталі є досить вивченим явищем. Так, в роботах А.Г.Сулова представлені дослідження утворення

динамічних похибок як при зовнішньому точінні (рисунок 1.9), так і при круглому зовнішньому шліфуванні заготовок, встановлених на жорстких нерухомих центрах (рисунок 1.13), а дослідження П.І. Ящеріцина, Р.Д. Хотєєвої розкривають загальний механізм утворення хвилястості при шліфуванні площини периферією круга (рисунок 1.14), актуальний і для процесу плоского фрезерування і обробки дисковими фрезами (з урахуванням особливостей протікання процесу).

Рисунок 1.13 – Схема формування динамічної хвилястості

Рисунок 1.14 – Схема утворення хвилястості при шліфуванні

Серед основних способів зниження геометричних похибок обробки, в тому числі хвилястості, виділяють:

- підвищення жорсткості технологічної системи;
- підвищення якості заготовки шляхом зниження вихідних геометричних похибок;
- ретельне балансування деталей, що швидко обертаються;

- застосування демфуючих пристроїв з метою зниження впливу зовнішніх джерел збурюючих коливань;
- вибір оптимальних значень режимів різання;
- контроль за станом металорізального інструменту та виконання своєчасних робіт щодо підтримання його працездатності і т. п.

Наявність хвилястості на поверхні деталі призводить до погіршення її експлуатаційних властивостей. Тому методи, що запобігають появі хвилястості або такі, що дозволяють передбачати (прогнозувати) наявність хвилястого профілю, в тому числі і його параметри, є актуальним напрямком досліджень.

#### 1.4 Прогнозування хвилястості обробленої поверхні методами математичного моделювання

Вплив хвилястості поверхні деталі на її експлуатаційні властивості вимагає її нормування. Тому прогнозування хвилястості на етапі проектування технологічного процесу є важливою практичною задачею.

Формування хвилястості відбувається за рахунок динамічних явищ при різанні. Більшість дослідників визнають, що динаміка при механічній обробці надає величезний вплив на точність і якість обробленої поверхні та в першу чергу на геометричні параметри якості. Для прогнозування динаміки і пружних витискань в технологічній системі зазвичай використовують рівняння балансу переміщень:

$$t_{\phi} = t - \Delta_{\text{пр}} - \Delta_i - \Delta_r + \Delta_{\text{т}}, \quad (1.2)$$

де  $t_{\phi}$ ,  $t$  – номінальна та фактична глибина різання відповідно;

$\Delta_r$ ,  $\Delta_i$ ,  $\Delta_{\text{пр}}$ ,  $\Delta_{\text{т}}$  – знімання металу, знос інструмента, пружні та температурні деформації в технологічній системі відповідно.

Всі макрогеометричні параметри процесу визначаються по розрахованим за формулою (1.2) значенням фактичної глибини різання. Такий підхід застосовується багатьма авторами для різних видів обробки як лезовим, так і абразивним

інструментом. При дослідженні вібрацій і автоколивань при механічній обробці також можна використовувати рівняння балансу переміщень. При цьому можливо не тільки визначення розміру і відхилень форми, але і прогнозування утворення хвилястості поверхні деталі.

Найбільш докладно динамічні явища при різанні металів розглянуті в роботах В.А. Кудінова. Саме ним закладені основи для дослідження стійкості системи. Він пропонує розглядати коливання не вздовж традиційних осей X, Y, Z, а вздовж узагальнених координат  $\xi_1$  і  $\xi_2$ . При описі системи застосовуються лінійні диференціальні рівняння і класичний апарат частотних характеристик. Використання частотних критеріїв стійкості дозволяє аналізувати небезпечні з точки зору збудження автоколивань режими обробки.

Питання дослідження автоколивань досить добре досліджено і розроблено. На підставі аналізу літературних даних основними їх джерелами є:

- зв'язки між внутрішніми станами системи (координатний зв'язок);
- запізнення і нелінійність внутрішніх параметрів системи (зазвичай сили різання);
- регенеративний ефект, пов'язаний із залежністю стану системи (профілю поверхні) від станів в попередні моменти часу.

Всі ці причини можна проаналізувати з допомогою побудови математичного опису у вигляді системи диференціальних або різницевих рівнянь, аналіз стійкості яких може проводитися методами теорії автоматизованого керування (ТАК). В літературі з ТАК є спеціальні критерії стійкості, що дозволяють отримувати залежності між параметрами системи для забезпечення стабільності її роботи і стійкості операції механічної обробки.

Фактично використання лінійних диференціальних рівнянь при описі системи дозволяє лише визначити межу виникнення автоколивань як межу стійкості системи. Саме прогнозування автоколивань в рамках лінійного опису системи неможливо. Тому деякі автори вводять для уточнення нелінійні характеристики системи. Зазвичай це торкається залежностей для розрахунку сили різання. Однак лінійні рівняння досить добре описують коливання за рахунок регенеративного

ефекту та явищ запізнення при різанні. Наприклад запропонована передаточна функція процесу візного точіння виду:

$$W(p) = \frac{a_{\psi}(p)}{V_{\pi}(p)} = \frac{1 - e^{-pT}}{p[1 + (1 - e^{-pT})\lambda]}, \quad (1.3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, що враховує деформації пружної системи;

$a_{\psi}$  – фактична товщина зрізу;

$V_{\pi}$  – поперечна подача;

$T$  – час обертгу деталі.

В роботі [20] використана передаточна функція процесу різання у вигляді паралельно з'єднаних аперіодичної і запізненої ланок:

$$W(p) = \frac{P}{u} = \frac{k_p (e^{-p\tau} - 1)}{T_p p + 1} \quad (1.4)$$

де  $P$  – сила;

$u$  – глибина;

$k_p$  – коефіцієнт різання;

$\tau$  – час обертгу заготовки;

$T_p$  – стала часу стругоутворення.

Таким чином, для отримання математичного опису технологічної системи досить часто використовують апарат передаточних функцій. Від передаточної функції зазвичай задають апріорі, а коефіцієнти, використовувани в описі, визначають на основі обробки експериментальних даних. Це називають ідентифікацією технологічної системи. Використання емпіричних моделей пов'язане з тим, що математичний опис процесів різання досі неможливий без використання експериментальних даних у зв'язку зі значною кількістю факторів і умов, що впливають на силу різання та процес стругоутворення.

## Висновки до розділу 1

1. Проведено систематичний аналіз формування геометричних параметрів поверхневого шару деталей, їх впливу на експлуатаційні властивості та технологічних факторів, що визначають появу хвилястості після різних методів механічної обробки. Установлено, що якість поверхні є комплексним показником, який включає макрорівності, хвилястість, шорсткість та зміни фізико-хіміко-механічних властивостей поверхневих шарів. Хвилястість посідає проміжне місце між макродефектами та шорсткістю, проте її вплив на експлуатаційні характеристики є суттєвим.

2. Хвилястість значною мірою визначає фактичну площу контакту спряжених деталей, впливає на рівень контактних напружень, знос, тертя, герметичність з'єднань, корозійну стійкість та інші параметри. Багато експлуатаційних властивостей залежать від висотних і крокових характеристик хвилястого профілю не менше, ніж від параметрів шорсткості, однак питання нормування хвилястості залишаються малодослідженими через відсутність відповідних стандартів.

3. Аналіз технологічних факторів показав, що формування хвилястості зумовлене як параметрами режимів різання, так і характеристиками ріжучого інструмента, властивостями технологічної системи та геометрією заготовки. Для лезової та абразивної обробки характерні як спільні, так і специфічні механізми появи хвилястості: при точінні домінує копіювання коливань інструмента, при шліфуванні – вібрації шліфувального круга та нестабільність процесу мікрорізання.

4. Визначено, що хвилястість є прямим наслідком динамічних процесів у технологічній системі, тому її прогнозування повинно базуватися на моделях, що враховують регенеративний ефект, пружні деформації, запізнення та автоколивання при різанні. Застосування математичних моделей у вигляді передаточних функцій і рівнянь балансу переміщень є найбільш ефективним підходом для розрахунку параметрів хвилястості на етапі проектування технологічного процесу.















## 2.2 Алгоритм ідентифікації операції механічної обробки

Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму ідентифікації

## **Висновки до розділу 2**

1. Наведена методика дає можливість суттєво спростити отримання частотних характеристик операції механічної обробки шляхом використання принципу суперпозиції та еталонних заготовок складного профілю. Застосування прямокутного профілю дозволяє сформувати широкий спектр гармонік, достатній для подальшої ідентифікації системи.

2. Проведення Фур'є-аналізу профілограм до та після обробки дає змогу визначити амплітудно-частотну характеристику технологічної системи. Алгоритм ідентифікації передбачає усунення сторонніх гармонік, що не пов'язані з





Полтавський державний аграрний університет

Рисунок 3.1 – Автоматизована схема для дослідження  
хвилястості обробленої поверхні: а – структурна схема; б – вид загальний















Рисунок 3.5 – Приклади побудованих АЦХ операцій:

а – експеримент 1; б – експеримент 2

Рисунок 3.6 – Приклади побудованих ЛАЧХ операції:

а – експеримент 1; б – експеримент 2

Полтавський державний аграрний університет

Рисунок 3.7 – ЛАЧХ, отримані внаслідок ДФЕ (таблиця 4.2):

а – експеримент 1; б – експеримент 2; в – експеримент 3; г – експеримент 4







Рисунок 3.9 – Апроксимація ЛАЧХ (таблиця 4.2);

а – експеримент 1; б – експеримент 2; в – експеримент 3; г – експеримент 4

Рисунок 3.10 – Приклад АЧК прізервної операції

### Висновки до розділу 3

1. Удосконалений профілограф-профілометр (модель 250) у поєднанні з багатофункціональною платою ЛА-70 та персональним комп'ютером дав змогу створити ефективну автоматизовану систему дослідження хвилястості та шорсткості поверхонь, що забезпечує цифровий запис профілограм і їх подальшу обробку в мережі.

2. Проведені метрологічні дослідження підтвердили високу точність системи: похибка масштабних коефіцієнтів за Ra не перевищує 1%, а за Rz – 5%, що дозволяє застосовувати систему для достовірного аналізу стану поверхонь. Через меншу варіативність Ra рекомендовано використовувати саме його для визначення масштабних коефіцієнтів.

3. Автоматизована система показала значну перевагу порівняно зі стандартним режимом роботи приладу – суттєво скорочено час отримання профілограм і забезпечено паралельність обробки даних завдяки використанню комп'ютерної мережі.

4. Застосування розроблених алгоритмів дозволило отримати частотні характеристики фрезерної операції (АЧХ та ЛАЧХ) шляхом розкладання профілю в ряд Фур'є та цифрової обробки результатів профілографування. Це створило основу для побудови математичної моделі процесу обробки.

5. Виконання дробового факторного експерименту ДФЕ  $2^{3-1}$  продемонструвало, що технологічні параметри (глибина різання  $t$ , подача  $S$ , частота обертання  $n$ ) суттєво впливають на частотні властивості операції, змінюючи форму ЛАЧХ та передаточної функції.

6. За результатами апроксимації ЛАЧХ у середовищі Excel методом найменших квадратів отримано передаточну функцію фрезерної операції з п'ятьма параметрами, залежними від режимів різання. Побудовані регресійні залежності підтвердили свою адекватність за критерієм Фішера, що дає змогу використовувати їх для прогнозування результатів обробки.

7. Отримані моделі дозволяють передбачати хвилястість обробленої поверхні залежно від хвилястості заготовки, а також оптимізувати режими фрезерування з метою зменшення дефектів мікрогеометрії.

Полтавський державний аграрний університет  
Полтавський державний аграрний університет  
Полтавський державний аграрний університет  
Полтавський державний аграрний університет  
Полтавський державний аграрний університет

## РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 4.1 Безпека робіт під час фрезерування

Безпека робіт під час фрезерування є комплексною системою організаційних, технічних і технологічних заходів, спрямованих на запобігання виробничим травмам, аваріям, пошкодженню обладнання та забезпечення стабільної якості обробки. Робота на фрезерних верстатах належить до категорії підвищеної небезпеки, оскільки поєднує високі швидкості різання, значні механічні навантаження, утворення гострої металевої стружки та використання мастильно-охолоджувальних рідин. Саме тому вимоги до безпечної експлуатації таких машин включають не лише базові правила охорони праці, а й глибоке розуміння конструкції верстата, закономірностей різання металів і специфіки технологічних процесів.

Оператор повинен розпочинати роботу з ретельного огляду обладнання, перевірки цілісності корпусу, наявності та надійності захисних кожухів, стану електричних з'єднань, справності микстоп аварійної зупинки та блокувань. Будь-які ознаки нестабільної роботи, такі як підвищена вібрація, сторонні звуки, нагрів електродвигуна або нерівномірне обертання шпинделя, повинні бути підставою для негайного припинення роботи та виклику технічного персоналу. Особливо важливо переконатися у правильності та міцності встановлення фрези та затиснення заготовки, оскільки неправильне закріплення може призвести до її викидання, руйнування інструмента або деформації шпиндельного вузла.

Організація робочого місця під час фрезерування повинна відповідати ергономічним вимогам і стандартам промислової безпеки. Простір навколо верстата має бути достатнім для вільного переміщення оператора, не зашарашеним сторонніми предметами та огороженим таким чином, щоб унеможливити випадковий доступ сторонніх осіб до зони обробки. Освітлення повинно забезпечувати чітку видимість зони різання та індикаторних пристроїв, не створюючи тіней або засліплювальних відблисків. Робоча поверхня та підлога повинні бути сухими, оскільки мастильно-охолоджувальні рідини та металеві стружки суттєво підвищують ризик ковзання. Відведення стружки повинно

здійснюватися правильною роботою стружковідводів, а очищення робочої зони допускається лише після повної зупинки інструмента. Категорично заборонено використовувати для очищення руки або ганчірки, оскільки навіть незначні залишки руху можуть спричинити захоплення та травмування. У випадку обробки матеріалів, що утворюють гарячу або абразивну стружку, необхідно застосовувати додаткові прозорі захисні екрани, які запобігають потраплянню частинок у бік оператора.

Засоби індивідуального захисту становлять важливий елемент безпеки фрезерувальних робіт. Спецодяг повинен щільно прилягати до тіла, не мати вільних рукавів або декоративних елементів, що можуть бути захоплені обертовим інструментом. Використання захисних окулярів або лицевих щитків є обов'язковим, оскільки металева стружка має високу швидкість та здатна спричинити серйозні травми очей. Під час роботи необхідно повністю виключити носіння перстнів, браслетів або годинників, а довге волосся повинно бути зібране й закрите. Рукавиці для роботи з верстатами з обертовим інструментом застосовувати заборонено, хоча вони допускаються для перенесення заготовок або очищення робочої зони після зупинки обладнання. Оператор повинен знати місцезнаходження аптечки, пожежного інвентарю та вміти користуватися первинними засобами пожежогасіння, оскільки мастильно-смащувальні рідини та електрообладнання створюють потенційні пожежонебезпечні ситуації.

Безпечне виконання фрезерувальних робіт значною мірою залежить від дотримання оптимальних режимів різання. Правильно підібрані швидкість обертання, подача та глибина різання забезпечують рівномірність навантаження на інструмент, запобігають його перегріванню та руйнуванню. Затуплена або пошкоджена фреза є особливо небезпечною, оскільки створює підвищені вібрації та нерівномірні зусилля, що можуть призвести до її поломки. Застосування охолоджувальних рідин повинно відповідати вимогам технологічного процесу та не порушувати правил екологічної безпеки. Оператор повинен стежити за тиском та подачею охолодження, щоб запобігти перегріву матеріалу та інструмента, уникнути задимлення або небезпечного випаровування.

Завершення фрезерних робіт повинно здійснюватися у чіткій послідовності. Спочатку необхідно перекрити подачу, зупинити обертання шпинделя та вимкнути

електроживлення. Очищення верстата від стружки, залишків мастильно-охолоджувальної рідини та забруднень допускається лише після повної зупинки всіх механізмів. Залишки металу слід видаляти щітками, гачками або спеціальними інструментами, не допускаючи контакту рук з гострими елементами. Мастильні матеріали, відпрацьовані рідини та металеві відходи повинні утилізуватися відповідно до встановлених норм. Оператор зобов'язаний занести необхідні дані до технічної документації, зафіксувати несправності та передати зміну у належному стані. Систематичне дотримання правил безпечної роботи під час фрезерування є фундаментом стабільної експлуатації обладнання, підвищення продуктивності, зменшення зношуваності інструменту та створення безпечного виробничого середовища для всього персоналу.

#### 4.2. Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження розгортання буде зумовлений зниженням трудомісткості:

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C - \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (4.1)$$

де  $\Delta C$  – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$  – збільшення вартості продукції, грн.;

$A_1$  – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування,  $A_1 = 0,1$ ;

$A_2$  – кількість продукції, т,  $A_2 = 8$  т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K$  – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн.  $K = 45000$  грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 75000 = 7500 \text{ грн./т,}$$

де 75000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час обробки:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

де  $\Delta Ц'$  – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц = 4370 \text{ грн. / т};$$

$$\Delta Ц = 4370 \text{ (грн./т)}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (7500 + 4370) \cdot 8 - (0,15 + 0,1) \cdot 45000 = 83710 \text{ (грн.)}$$

Отже, економічний ефект від впровадження фрезерування склав 83710 грн. на рік.

#### 4.5 Екологічна безпека при фрезеруванні

Екологічна безпека під час фрезерування є важливою складовою сучасного виробництва, оскільки процес різання металу супроводжується утворенням стружки, випаровуванням мастильно-охолоджувальних рідин, виділенням аерозолів та шумових навантажень, що впливають не лише на умови праці оператора, а й на навколишнє середовище. Рациональна організація технологічного процесу передбачає зменшення негативного впливу на повітря, ґрунти та водні ресурси через оптимізацію обробки, застосування вискоефективних систем очищення, а також впровадження технологій замкнутого циклу використання технічних рідин. Одним із ключових аспектів екологічної безпеки є вибір мастильно-охолоджувальних рідин, оскільки їх фізико-хімічні властивості визначають інтенсивність утворення шкідливих випарів та ступінь забруднення довкілля. Більш безпечними вважаються

синтетичні та напівсинтетичні склади з мінімальним вмістом токсичних компонентів і покращеними біоцидними характеристиками, які знижують ризик бактеріального забруднення та неприємних запахів.

Під час фрезерування утворюються дрібнодисперсні аерозолі, які можуть потрапляти в атмосферу виробничих приміщень. Для їх знешкодження необхідно забезпечувати ефективну вентиляцію, включаючи роботу місцевих відсмоктувачів, які видаляють забруднення безпосередньо від зони різання. Такі системи не лише покращують якість повітря, але й зменшують ризик осідання масляного туману на поверхнях, що може викликати додаткові ризики для персоналу. Важливим фактором є також контроль температурних режимів, оскільки перегрів мастильно-охолоджувальної рідини підсилює інтенсивність випаровування та хімічних реакцій, здатних погіршувати екологічні показники. Використання замкнутих систем обігу рідин дозволяє значно скоротити їх витрату, забезпечити фільтрацію та подовжити термін служби, тим самим мінімізуючи утворення відходів.

Металева стружка, що утворюється під час фрезерування, становить окремий тип технічних відходів. Залежно від матеріалу заготовки вона може містити залишки мастильних рідин та інші забруднювачі, що вимагає її правильної підготовки до утилізації. Для зменшення екологічного навантаження стружку необхідно збирати у спеціальні контейнери, забезпечувати її віджимання або центрифугування з метою видалення надлишків технічних рідин, після чого направляти на переробку. Вторинне використання металевої стружки є важливою складовою забезпечення раціонального використання природних ресурсів, зменшуючи потребу в первинній сировині та знижуючи кількість промислових відходів.

Особливу увагу під час фрезерування необхідно приділяти запобіганню забрудненню ґрунтів і водних ресурсів. Будь-які мастильні матеріали та охолоджувальні рідини повинні зберігатися у герметичних ємностях, а місця їх розливу потрібно негайно локалізувати за допомогою сорбентів та утилізувати згідно з екологічними нормами. Скидання відпрацьованих рідин у каналізацію є неприпустимим, оскільки вони можуть містити важкі метали, ПАР та інші токсичні речовини. Підприємство має бути оснащено системами збору та регламентованої утилізації технічних рідин через спеціалізовані організації, що забезпечують їх

переробку або знешкодження згідно з діючими нормативами. Регулярний контроль стану трубопроводів, резервуарів та насосних станцій зменшує ризик аварійного витіску, який може призвести до масштабного екологічного забруднення.

Важливою частиною екологічної безпеки фрезерування є також контроль шумового та вібраційного навантаження. Високошвидкісна обробка металів супроводжується значним рівнем шуму, який негативно впливає на персонал і створює акустичне навантаження на навколишнє середовище. Використання сучасних фрез із покращеними геометричними характеристиками, правильний підбір режимів різання та регулярне технічне обслуговування верстата дозволяють істотно знизити цей вплив. Додатково застосовуються звукопоглинальні матеріали та огороження, які не порушують технологічний процес і забезпечують комфортні умови роботи.

Екологічна безпека під час фрезерування значною мірою залежить від рівня підготовки персоналу. Оператор має розуміти принципи поводження з технічними рідинами, вплив параметрів обробки на утворення шкідливих викидів, правила роботи з системою вентиляції та фільтрації. Проведення регулярних інструктажів, навчання та аудит екологічної безпеки сприяють формуванню відповідального ставлення до природних ресурсів та виробничого середовища. Систематичне впровадження екологічних стандартів дозволяє зменшити шкідливий вплив виробництва, підвищити економічну ефективність та забезпечити сталість технологічних процесів відповідно до сучасних вимог охорони довкілля.

#### **Висновки до розділу 4**

У результаті проведених досліджень, розрахунків та аналізу було встановлено, що практична реалізація розробок у сфері фрезерної обробки забезпечує комплексне підвищення ефективності виробничого процесу, зокрема за рахунок удосконалення технології, покращення умов праці та зниження негативного впливу на довкілля. Запропоновані заходи з безпеки робіт під час фрезерування демонструють, що належна організація робочого місця, дотримання регламентованих режимів різання, використання засобів індивідуального захисту, контроль технічного стану

обладнання та правильне поводження з охолоджувальними рідинами є основними факторами, які визначають рівень виробничої безпеки. Їх систематичне впровадження забезпечує зменшення ризиків травматизму, продовження ресурсу інструмента, стабільність технологічного процесу та високу якість готових деталей.

Проведений економічний розрахунок засвідчив, що впровадження запропонованих технічних заходів має виражений позитивний економічний ефект. Зниження трудомісткості, оптимізація технологічних операцій та покращення характеристик обробки сприяли зменшенню собівартості продукції та збільшенню її вартості за рахунок підвищеної точності та якості. Розрахований річний економічний ефект підтверджує доцільність упровадження розробок у виробничий процес і демонструє потенціал подальшої модернізації фрезерної ділянки.

У межах екологічної складової доведено, що фрезерні роботи, попри наявність стружкоутворення, аерозолів мастильно-охолоджувальних рідин та шумового забруднення, можуть бути значно екологізовані за умови правильного підходу до організації процесу. Використання сучасних охолоджувальних рідин, систем локальної вентиляції, технологій замкнутого циклу відпрацьованих рідин, регламентоване поводження зі стружкою та контроль герметичності технічних ємностей дозволяють мінімізувати вплив виробництва на навколишнє середовище. Важливою залишається роль підготовки персоналу, оскільки саме кваліфікований оператор здатен забезпечити дотримання екологічних норм і підтримувати високий рівень культури виробництва.

## ВИСНОВКИ

1. Під час аналізу експлуатаційних умов деталей сільськогосподарських машин встановлено, що хвилястість поверхні значною мірою впливає на їх зносостійкість, щільність прилягання, навантажувальну здатність та ресурс роботи, що підтверджує необхідність її контролю. Хвилястість формується під впливом поєднання коливань системи «верстат-інструмент-заготовка», режимів різання та особливостей кінематики процесу, що дозволяє керувати її параметрами.

2. Запропонована методика прогнозування хвилястості забезпечує можливість оцінки параметрів поверхні до виконання обробки, що відкриває шлях до оптимізації технологічних рішень та зменшення кількості браку.

3. Вибір раціональних режимів фрезерування дозволив знизити величину хвилястості та підвищити якість поверхонь, що сприяє покращенню експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарських машин.

4. Розроблені заходи з підвищення безпеки робіт при фрезеруванні забезпечують зниження ризику виробничого травматизму, підвищення надійності процесу та поліпшення умов праці оператора. Техніко-економічні розрахунки довели доцільність впровадження оптимізованих режимів механічної обробки, оскільки вони забезпечують зниження собівартості продукції та збільшення річного економічного ефекту. Аналіз екологічної безпеки показав, що модернізація технологічного процесу, впровадження систем очищення та контроль за мастильно-охолоджувальними рідинами дають можливість зменшити негативний вплив на довкілля.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Швець С.В. Металорізальні інструменти: навчальний посібник. Суми: СумДУ, 2019. 272 с.
2. Данчилова Л.М., Лапковський С.В., Приходько В.П. Різальний інструмент: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 147 с.
3. Stephenson D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice. Florida: CRC Press, 2019. 947 p.
4. Гудніков А.А. Основи стандартизації, допуски, посадки і технічні вимірювання. Київ, 2006. 294 с.
5. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання (2-е видання доповнене і перероблене) : підручник / за ред. І.С. Сірого. Київ : Аграрна освіта, 2009. 353 с.
6. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання: підр. для студ. вищ. навч. закл. / за ред. Іванова Г.О., Шебаніна В.С. 2-е вид., перероб. і доповн. Київ : Видавництво „Аграрна освіта”, 2010. 577 с.
7. Когут М.С., Лебідь Н.М., Білоус О.В., Кравець І.Є. Основи взаємозамінності, стандартизації, сертифікації, акредитації та технічні вимірювання. Львів : Світ, 2010. 528 с.
8. Саранча Г.А., Якимчук Г.К. Метрологія, стандартизація та управління якістю: підручник. Київ : Основа, 2004. 376 с.
9. Цюцюра В.Д., Цюцюра С.В. Метрологія та основи вимірювань: навч. посіб. Київ : Знання-Прес, 2003. 180 с.
10. Чалий, В. Д., Мороз, С. А., Пташенчук, В. В. «Simulation of formation waviness on working surfaces rings of roller bearings during centerless grinding operations», *Technology audit and production reserves*, 2015. DOI: 10.1558/12312-8372.2015.51518
11. Maiboroda V., Dzhulii D., Zelinko A., Burikov A. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet and-type heads 3. The influence of the types of the working heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining. *Mech.*

*Adv. Technol.*, 2021. Vol. 5, no. 1, pp. 97–102. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813>

12. Chen, D., Gao, X., Dong, L., Fan, J. «An evaluation system for surface waviness generated by the dynamic behavior of a hydrostatic spindle in ultra-precision machining», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. DOI: 10.1007/s00170-016-9918-0

13. Ebrahimi, E., *et al.* «Tribo-dynamic effects of machining-caused surface waviness on a line contact», *Physics of Fluids*, 2024. DOI: 10.1063/5.0235004

14. Gusev, V. G., Fomin, A. A. «Multidimensional model of surface waviness treated by shaping cutter», *Procedia Engineering*, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.475

15. Kharach, G. M., Eksler, L. L. «Standardization of surface waviness in machine parts», *Measurement Techniques (Meas Tech)*, 1971. DOI: 10.1007/BF00994685

16. Jiang, L., *et al.* «The research of surface waviness control method for 5-axis flank milling», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. DOI: 10.1007/s00170-013-5041-7

17. Lin, X. «Research on the mechanism of milling surface waviness formation in thin-walled blades», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0669-3

18. Posdzych, M., Stöckmann, R., Klimant, F., Putz, M. «Investigation of the influence of surface waviness of aluminium on the burnishing quality of a combined process», *Procedia Manufacturing*, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.185

19. Wang, *et al.* «Effect of surface waviness on the static performance of aerostatic journal bearings», *Tribology International*, 2016. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.07.026

20. Pan, *et al.* «An investigation of the surface waviness features of ground surface in parallel grinding process», *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105351