

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: «Аналіз та удосконалення технології позацентрового зовнішнього
шліфування втулок підшипників ковзання»

KPM.133ГМмд_21.07.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«*Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва*»
спеціальності 133 «*Галузь
машинобудування*»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_21
ХУКАЛЕНКО Ігор

Керівник: канд. техн наук, доцент
ПОПСВ Станіслав

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Підвищення надійності і довговічності продукції сільськогосподарського машинобудування досягається за рахунок застосування нових конструкційних матеріалів і поліпшення показників якості основних функціональних поверхонь елементів виробів. Виготовлення деталей з нових композиційних порошкових матеріалів призводить до зростання експлуатаційних характеристик виробів і трудомісткості виготовлення їх елементів. Специфічна структура і низька оброблюваність деталей з цих матеріалів впливає на трудомісткість процесів обробки, вибір технологічних умов при обробці втулок підшипників ковзання насосів, виконаних з порошкового композиційного матеріалу на базі карбиду вольфраму (реліт). На даний час створені наукові основи процесу шліфування, вивчені питання точності та якості поверхні деталей машин, розроблені технологічні методи абразивної обробки, які широко і успішно застосовуються в різних галузях машинобудування.

Існує безліч чинників, що визначають тимчасову нестабільність функціональних і вихідних характеристик процесів позацентрового шліфування. Забезпечення стабілізації вихідних параметрів процесу позацентрового шліфування, необхідних продуктивності і якості обробки, є найважливішим завданням. Повною мірою це відноситься до процесу остаточного позацентрового шліфування зовнішніх поверхонь втулок підшипників ковзання насосних установок, робоча поверхня яких виконана з порошкового композиційного матеріалу.

Заготовки втулок підшипників ковзання відцентрово-вихрового насоса отримують методом порошкової металургії, що включають операції пресування композиційної суміші і наступного спікання. Обробка таких заготовок обумовлена значними труднощами, так як основою композиційного матеріалу є порошковий карбід вольфраму, який відноситься до групи важкооброблюваних матеріалів. При позацентровому шліфуванні заготовок на підприємстві застосовуються карбідокремнієві шліфувальні круги, якими забезпечується необхідна точність зовнішнього діаметра втулки, але виникають проблеми забезпечення геометричного показника шорсткості поверхні. На шліфованій поверхні втулки відзначається

наявність хаотично розташованих грубих рисок і вибоїв від вирваних силами різання окремих зерен або блоків зерен, з робочої поверхні шліфувального круга. Зазначене вище призводить до нестабільності процесу шліфування, прискоренню зносу абразивного круга, до збоїв в процесі шліфування, появи браку, збільшення трудомісткості обробки.

У поточний момент часу немає досліджень з ведення технологічного процесу обробки і забезпечення шорсткості поверхні при позацентровому шліфуванні заготовок з матеріалу «реліт», що не дозволяє призначати максимальні параметри режиму шліфування при забезпеченні необхідної якості обробленої поверхні, а також обґрунтовано управляти процесом шліфування і знаходити шляхи, що розширюють технологічні можливості.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Конструктивне виконання та умови роботи захисної втулки

Різновид конструктивних особливостей і елементів відцентрових установок для транспортування рідин досить повно представлено у роботах [1, 2, 3]. Занурений відцентровий насос (рисунок 1.1) збирається з апаратів напрямних 1 і коліс робочих 2, які монтуються на валу 3 і поміщаються в корпус 4, виконаний із сталеві хонінгованої трубної заготовки.

Кількість напрямлюючих апаратів і робочих коліс (ступенів) в обладнанні для підйому води в залежності від виконання установки, може бути від 81 і до 412, що обумовлено забезпеченням необхідного напору.

Захисні втулки 5 з матеріалу композиційного матеріалу входять до складу радіального підшипника ковзання зануреного відцентрового насоса (рисунок 1.1). Другим елементом підшипника, з яким столучається захисна втулка, так само є втулка, що пресується або в основу насоса, або в проміжний підшипник і може бути з твердого сплаву, бронзи або чавуну. Захисна втулка (рухома на валу) спільно з відповідною втулкою (нерухома) утворюють радіальний підшипник ковзання. Підшипник ковзання сприймає радіальні навантаження від валу зануреного насоса, що обертається зі швидкістю до 2980 хв^{-1} , працює в середовищі з великим вмістом домішок, шлаків, піску, хімічно-активних елементів, що негативно впливає на знос і довговічність підшипникового вузла.

Втулка захисна (рисунок 1.2), має просте конструктивне виконання і є технологічною у виготовленні. Її конструкція дозволяє застосовувати високопродуктивні методи обробки і має хороші базові поверхні для обробки. Можливо поєднання вимірювальних і технологічних баз при обробці виробів за технологічним маршрутом. Елементи деталей можуть бути оброблені на верстатах нормальної точності. Передбачені технічні вимоги із взаємного розташування поверхонь втулки: радіального биття $\text{Ø}30\text{с}8$ до внутрішнього отвору $\text{Ø}20\text{Е}9$ в межах допуску $0,04 \text{ мм}$ і відхилення від симетричності внутрішнього паза $1,6\text{D}10$ до $\text{Ø}20\text{Е}9$ в межах допуску $0,05 \text{ мм}$. Найбільш точними є поверхні $\text{Ø}30\text{с}8$, $\text{Ø}20\text{Е}9$.

Вимірювання розмірів можна здійснювати стандартним інструментом. Технічні вимоги на втулку наведені у таблиці 1.1.

Полтавський державний аграрний університет

Таблиця 1.1 – Технологічні вимоги до елементарних поверхонь втулки захисної

Елементарні поверхні	Розмір	Допуск розміру, мм	Шорсткість, R_a , мкм	Допуск форми і розташування
Зовнішня циліндрична поверхня	Ø30с8	0,024	1,25	
Внутрішня циліндрична поверхня	Ø20г9	0,052	2,5	-
Торцеві поверхні втулки	35h12	0,25	3,2	-
Шпонковий паз	20,9	0,2	2,5	
	1,6D10	0,04	2,5	

Однак при виготовленні втулки виникає ряд технологічних проблем:

1. Наявність сталевих обичайки, що залишилася після отримання вихідної заготовки, яку необхідно видалити при попередній токарній обробці. Цьвітністю видалити технологічну обичайку, або залишити її мінімальний припуск на подальшу обробку неможливо не торкнувшись різцем внутрішнього композитного шару.

2. При подальшому шліфуванні периферії втулки, в момент переходу від сталевих частин втулки до композитного шару, необхідно підбирати характеристику шліфувального круга, що дозволяє одночасно вести шліфування двох різних за оброблюваністю матеріалів: конструкційної сталі і композиту.

3. У довідковій літературі відсутня інформація за фізико-механічними властивостями композитного матеріалу типу «реліт», що не дозволяє нормативно призначити характеристику абразивного інструменту та параметри режиму шліфування.

1.2 Хімічний склад та твердість

Матеріали підшипників, виконані на основі карбіду вольфраму W_2C , мають зносостійкість в абразивному середовищі на рівні твердого сплаву ВК8, крім того, вони мають значно кращі характеристики пластичності, абсолютно нечутливі до ударних навантажень та вібрації (рисунок 1.3).

Релітовий шар являє собою рівнорозподілені в мідній зв'язці зерна карбіду вольфраму W_2C високою мікротвердістю $HV_1 = 12,2$ ГПа, при твердості мідної зв'язки $HV_2 = 1,0$ ГПа [4] (рисунок 1.3).

Наведені дані, про твердості карбіду вольфраму дозволяють віднести матеріал «реліт» до важкооброблюваних, що передбачає специфічний вибір характеристики абразивного інструменту та параметрів режиму позацентрового зовнішнього шліфування.

1.3 Базова технологія, шляхи удосконалення

Заготовка захисної втулки (рисунок 1.4) являє собою складальну одиницю, що складається з п'яти складових частин: 2-х втулок центруючих 1, втулки внутрішньої 2, суміші композитної 3, яка є елементом підшипника ковзання у вузлі. Крім того, заготовка втулки має технологічну обичайку 4, яка необхідна лише для попереднього пресування і наступного спікання композитної суміші.

Базовий технологічний маршрут механічної обробки захисної втулки з включає технологічні операції, наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Технологічний маршрут механічної обробки втулки

№ операції	Найменування операції	Модель обладнання	Технологічне оснащення	Трудо-місткість, Т _{штг} , хв.
005	Точарна (зняття максимального припуску зі сталеві обичайки)	1K62	Центр рифлений А-1-4-Н, державка PCLNP 2525M12, пластина CNMG 120404-MF 2015. Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02.	0,03
010	Позацентрово-шліфувальна (повне видалення сталеві обичайки 1,5 мм, обробка композитного шару під фінішне алмазне шліфування)	3M184U	Круг 1 500x150x305 P40N7 V35A. Мікрометр МК 50-0,01.	0,025

Продовження таблиці 1.2

№ операції	Найменування операції	Модель обладнання	Технологічне оснащення	Трудо- місткість, Т _{шт} , хв.
015	Токарна з ЧПК (розточування отвору, підрізання торців, точіння фаски)	СВ141П	Державка PCLNP 2525M12, пластина CNMG 120404-MF 2015, державка S12MSCL-06, пластина CCMT 060204- SMIC907 Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02.	0,03
020	Токарна з ЧПК (розточування отвору, підрізання торців, точіння фаски)	СВ141П	Державка PCLNP 2525M12, пластина CNMG 120404-MF 2015, державка S12MSCL-06, пластина CCMT 060204- SMIC907. Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02, пробка Ø20E9, штатив ШМ-III-8, індикатор 2 МИГ-1, отвірка 7201-9349-02.	0,33
025	Круглошліфувальна (алмазне шліфування діаметра)	ЗК12	Круг 1A1 300x40x127 АСЧ 100/80 В2-01. Мікрометр МК 50-0,01, скоба Ø30с8.	0,08

Продовження таблиці 1.2

№ операції	Найменування операції	Модель обладнання	Технологічне оснащення	Трудо-місткість, $T_{шт}$, хв.
030	Горизонтально-протягувальна (протягування шпонкового пазу)	7520	Протяжка шпонкова. Калібр 1,6D10, глибиномір шпонковий $20,9^{+0,2}$, калібр для контролю симетричності T0,05	0,008

Найбільш трудомісткою і дорогою операцією технологічного маршруту виготовлення втулки є операція 025 (шліфування зовнішнього діаметра втулки алмазним кругом на круглошліфувальному напівавтоматі). Зниження трудомісткості виготовлення втулки, можливо за рахунок заміни цієї операції на операцію позакентрового шліфування, яка за її технологічними можливостями забезпечує необхідні точність і шорсткість зовнішньої поверхні деталі, раніше одержувані алмазною обробкою на круглошліфувальних верстатах.

При переході на високопродуктивне позакентрове шліфування зовнішньої поверхні втулки абразивним інструментом не виникає таких проблем із забезпеченням точності зовнішнього діаметра ($\varnothing 30\text{с}8$) а вимогу по шорсткості поверхні ($Ra < 1,25$ мкм) не вдається досягти. При цьому, крім високої шорсткості поверхні ($Ra = 2,5 \dots 3,2$ мкм), на шліфованих зовнішніх циліндричних поверхнях втулок були зафіксовані хаотично розташовані грубі риси і виривання ком позитного шару (рисунок 1.5).

Це зумовлено вириванням окремих абразивних зерен або блоків зерен шліфувального круга. Зазначене визначає самостійну виробничу і наукову проблему технологічного забезпечення необхідної шорсткості поверхні при високопродуктивному позацентровому зовнішньому шліфуванні втулок з шаром із композитного матеріалу.

1.4 Кінематика формоутворення поверхні

Позацентрове шліфування це один з найбільш продуктивних методів шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь. Обробка виконується на позацентрово-шліфувальних верстатах, де деталь розташовується між шліфуючим і ведучим колами і підтримується опорою зі скосом в формі ножа. Скіс виконується в сторону ведучого круга, завдяки чому деталь постійно притискається до цього круга. Опорний ніж встановлюється таким чином, щоб вісь оброблюваної деталі перебувала вище лінії центрів кругів. Вісь деталі встановлюється вище осі кругів на величину $h = (0,1 \dots 0,3) d$, де d – діаметр деталі. При позацентровому шліфуванні не потрібно затискати деталь, примусово обергати і забезпечувати її подачу відносно шліфуючого круга. Обертання деталі і її поздовжнє переміщення забезпечується за рахунок сил тертя між деталлю і ведучим кругом, вісь якого встановлюється під кутом $\alpha = 1-5^\circ$ до осі шліфуючого круга (рисунок 1.6). Швидкість поздовжньої подачі залежить від кута α . Даний метод забезпечує точність розмірів за 7 квалітетом із відхиленнями форми і розташування $\max 2,5$ мкм і якістю поверхні $R_a = 0,32-0,16$ мкм. Число проходів на шліфування залежить від припуску, що визначається

значенням вихідних похибок, а також необхідною точністю і шорсткістю оброблюваної поверхні [5].

Позацентрові круглошліфувальні верстати широко застосовуються у великосерійному і масовому виробництвах. Вони продуктивніше від центрових верстатів, допускають більшу глибину шліфування, жорсткіше. Для обслуговування верстата не потрібна висока кваліфікація робітника.

Вектор швидкості ведучого круга розкладається на вектор швидкості обертання деталі V_D і вектор швидкості її поздовжнього переміщення V_{np} . Шліфувальний круг має швидкість на периферії 30...35 м/с, ведучий – 15...30 м/хв. Обертальний рух деталі забезпечується силою тертя між ведучим кругом і деталлю, яка значно більше сили різання. Для збільшення сили тертя ведучий круг виготовляють на вулканітовій зв'язці, зернистістю Р10 і твердістю N7.

Кут α впливає на продуктивність обробки і якість шліфованої поверхні. Чим він більший, тим вища продуктивність, але гірше шорсткість обробленої поверхні. Його значення рекомендують призначати для чорнових операцій $\alpha = 3...5^\circ$, а для чистових $\alpha = 1...2^\circ$ [6].

1.5 Рекомендовані характеристики інструмента, режими

Залежно від виду використовуюваного абразивного матеріалу розрізняють алмазні, ельборові, електрокорундові, карбідокремнієві та інші абразивні інструменти. Відомості про абразивні матеріали в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Рекомендації щодо застосування матеріалу [7]

Абразивний матеріал	Марка абразивного матеріалу	Абразивний інструмент	Застосування
1	2	3	4
Алмаз	A	Незакріплене зерно, пасти, круги, бруски, олівці, ролики	Шліфування, різання, доведення і обробка твердих сплавів чавунів, кераміки, правка шліфувальних кругів
Карбід кремню чорний	53С	Незакріплене зерно, пасти	Оздоблення і доведення чавунних заготовок, а також заготовок з кольорових металів і їх сплавів незакріпленими мікропорошками
		Круги, бруски, сегменти, шліфувальна шкурка	Обробка заготовок з чавуну, кольорових металів і вольфрамових твердих сплавів інструментами з шліфувальних порошоків і мікропорошків на всіх зв'язках. Шліфування, обробка і доведення незакріпленим зерном і шліфувальною шкуркою
	64С	Те ж	Обробка заготовок з чавуну, кольорових металів і вольфрамових твердих сплавів інструментами з шліфувального зерна на всіх зв'язках.

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
Карбід кремнію зелений	62С	Незакріплене зерно, пасти, круги, бруски, шліфувальна шкурка	Обробка заготовок з чавуну, алюмінію, міді, граніту, мармуру інструментами з шліфувальних порошків на всіх зв'язках. Доведення вільним зерном, шліфувальною шкуркою
	63С	Круги, бруски, сегменти, шліфувальна шкурка	Обробка титанових і титанотанталових твердих сплавів інструментами з шліфувального зерна на всіх зв'язках. Оздоблення і доведення шліфувальною шкуркою
	64С	Незакріплене зерно, круги, бруски	Обробка заготовок з чавуну, міді, алюмінію, граніту, мармуру інструментами з шліфувального зерна і мікропорошків на всіх зв'язках. Швидкісне шліфування заготовок з чавунів колами на керамічній зв'язці
Суміш із зеленого і чорного карбіду кремнію	60% 63С+40% 54С	Кола, бруски, сегменти, шліфувальна шкурка	Обробка заготовок з твердих сплавів, чавунів і кольорових металів
Карбід бору	В ₄ С	Незакріплене зерно, пасти	Шліфування, обробка та доведення незакріпленим зерном твердосплавних деталей, чавунів

Існуючий технологічний процес виготовлення втулки характеризується наступними параметрами режиму позacentрового шліфування:

- швидкість абразивного різання, м/с:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60 \cdot 1000}, \quad (1.1)$$

де D_k – діаметр шліфувального круга, мм;

n – частота обертів шліфувального круга, 1380 об/хв,

- швидкість обертання деталі, м/хв:

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_{вк} \cdot n_{вк}}{1000}, \quad (1.2)$$

де $D_{вк}$ – діаметр ведучого круга, мм;

$n_{вк}$ – частота обертання ведучого круга, 100 об/хв;

- глибина різання t – не більше 0,01...0,05 мм/прохід;

- швидкість позадвжньої подачі, м/хв:

$$V_{np} = V_D \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.3)$$

де α – кут розвороту осі ведучого круга відносно осі деталі.

Режим різання при шліфуванні, що забезпечує найбільшу продуктивність, найменшу собівартість і отримання необхідної якості обробленої поверхні, вважається оптимальним режимом [8].

Технологічні умови режиму шліфування призначають в наступній послідовності:

1) вибирають типорозмір і характеристику шліфувального круга і встановлюють його колову швидкість V_k ;

2) призначають глибину шліфування (поперечну подачу) і визначають кількість проходів, необхідних для видалення всього припуску. Глибина різання знаходиться в межах $t = 0,005 \dots 0,09$ мм за подвійний хід. Значення поперечної подачі для обробки деяких конструкційних матеріалів наведені в таблиці 1.4;

Таблиця 1.4 – Граничні значення поперечної подачі, мм за подвійний хід

Матеріал деталі	Чистове шліфування, t, мм	Чорнове шліфування, t, мм
Сталь загартована	0,005...0,010	0,01...0,06
Сталь незагартована	0,006...0,020	0,02...0,08
Чавун	0,008...0,030	0,03...0,09

3) призначають колову швидкість деталі V_D . При чорновому шліфуванні швидкість деталі зазвичай знаходиться в межах 20...80 м/хв, при цьому слід приймати період стійкості шліфувального круга ($T = 25...60$ хв), а при чистовому шліфуванні – з умови забезпечення необхідної шорсткості поверхні;

4) призначають подовжню подачу $V_{пр}$ при круглому шліфуванні в залежності від прийнятого кута розвороту ведучого круга α ;

5) підбирають охолоджуючу рідину;

6) визначають витрачені сили різання і потужність, необхідні для здійснення процесу шліфування. Потужність, кВт, для обертання круга визначається з умови:

$$N_k \geq \frac{P_z V_k}{1000 \cdot \eta}, \quad (1.4)$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання, Н;

η – ККД приводу верстата, 0,7...0,8;

7) параметри режиму обробки, що призначаються виходячи з технічних обмежень верстата. При недостатній потужності основного приводу зменшують V_D або $V_{пр}$, так як вони впливають на затрачену потужність різання N_k і основний час t_0 ;

8) розраховують машинний час на виконання операції з виразу:

$$t_m = \frac{(l \cdot q + B_k)}{q \cdot V_{пр}} \cdot i \cdot K_s, \quad (1.5)$$

де l – довжина деталі, мм;

q – кількість деталей в партії, шт.;

V_k – ширина круга, мм;

i – число проходів;

$K_3 = 1,05 \dots 1,20$.

Характеристика інструменту і параметри режиму шліфування, що застосовуються в існуючому технологічному процесі (операція 010) на підставі вищенаведених рекомендацій: шліфувальний круг – $1500 \times 150 \times 305$ 54С Р40N7 V; параметри режиму шліфування – $V_k = 35$ м/с, $V_D = 2$ м/с, $t = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha = 4^\circ$ ($V_{пр} = 8,4$ м/с).

1.6 Характеристики позацентрального шліфування

Найважливішою технологічною властивістю будь-якого застосованого в машинобудуванні матеріалу, є різанням. Під оброблюваністю розуміють комплексну характеристику, яка включає кілька найважливіших показників:

1 Сили різання, які характеризують процес обробки з точки зору енерговитрат.

Збільшення швидкості різання V_k з одного боку веде до зниження сил різання, але при цьому відбувається збільшення температури в зоні контакту, що призводить до збільшення температурних деформацій компонентів системи СПД, а отже до погіршення якості обробки. Збільшення кошової подачі V_D і глибини різання t веде до збільшення як сил так і температури в зоні контакту, будучи першопричиною і пружних, і пластичних деформацій, що виникають в процесі обробки. В результаті дії сил відбуваються коливання в системі СПД, що призводить до погіршення параметрів якості поверхні, і до збільшення зносу круга, що проявляється у вигляді сколів і виривів зерен і блоків зерен з абразивного круга [9].

2 Температура в зоні контакту інструменту з деталлю характеризує теплонапруженість процесу шліфування.

На температуру різання при шліфуванні впливають оброблюваний матеріал, значення параметрів режиму обробки, геометричні параметри характеристик абразивних зерен інструменту і їх розміри, МОР і способи її подачі в зону обробки при шліфуванні [6].

Основний же вплив на температуру різання надають механічні властивості шліфованого матеріалу. Чим вище межа міцності σ_v і твердість HB оброблюваного матеріалу, тим вище сила різання, яку необхідно прикласти для стружкоутворення, отже, більше теплоти буде виділено і буде вище температура різання. Завищення параметрів режиму шліфування веде до збільшення середньоконтактної температури. Збільшення температури на контактних поверхнях абразивного зерна викликає затуплення ріжучих кромки і згодом може викликати збільшення частки пластичної деформації зрізаного матеріалу. Зростання температури на поверхні, що шліфується, призводить до появи мікротріщин, які при експлуатації деталі можуть викликати її руйнування. Так само збільшення температури впливає на зміну лінійних розмірів елементів системи СПД, що безпосередньо впливає на точність обробленої деталі. Для зменшення тепловиділення, полегшення стружкоутворення і зменшення тертя застосовуються різні види МОР [10].

Знос визначається стійкістю ріжучого інструменту.

Збільшення швидкості різання V_K , колівої подачі V_D , глибини різання t і часу роботи веде до підвищення зносу ріжучих зерен абразивного інструмента, а отже зростають сили різання, і збільшуються температура в зоні контакту інструмента з деталлю.

Третій показник є найбільш значущим, оскільки саме він найчастіше обумовлює поєднання допустимих параметрів режиму шліфування, що визначають необхідну продуктивність і якість обробки [11].

Шорсткість обробленої поверхні є вихідною характеристикою якості поверхні виробу в процесі шліфування.

Підвищення швидкості різання V_K сприятливо впливає на сили різання – знижується значення геометричного показника шорсткості оброблюваної поверхні обумовлене вібрацією інструменту відносно заготовки. Підвищення колівої подачі V_D і глибини різання t веде до підвищення шорсткості, будучи причиною підвищення корозії деталей при експлуатації [10].

1.7 Підвищення ефективності обробки

Надійність і довговічність втулок захисних більшою мірою залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу втулки. Так само значну роль на експлуатаційні характеристики, відіграє спосіб формування поверхні деталей, що задає якість поверхневого шару. На поверхневий шар втулки підшипника ковзання, припадає вплив агресивних середовищ, впливають сили розтягу-згину, вібраційні навантаження. Отже, саме від якості поверхневого шару, залежать всі експлуатаційні характеристики підшипника ковзання.

Найбільш доцільно, вести процес обробки втулок підшипників, на режимах обробки, що забезпечують максимальну продуктивність при цьому не погіршують допустимі параметри якості виготовлених деталей.

Достягнення цих результатів можливо за рахунок:

1 Підбору самих раціональних способів і схем обробки деталей

2 За рахунок використання обладнання, що забезпечує стабільний процес обробки при максимальній продуктивності, на якому буде шліфуватися деталь.

3 Використання абразивного інструменту з необхідними характеристиками.

4 За рахунок підбору і обґрунтування параметрів режиму обробки, що забезпечують оптимальну продуктивність при необхідних показниках якості обробленої поверхні

Аналіз літератури [8, 12, 13] про шліфування матеріалів, що володіють низькою оброблюваністю підтверджує дані шляхи оптимізації процесу шліфування. Аналіз виробничого досвіду по позацентричному шліфуванню втулок з матеріалу «реліт», дозволяє зробити наступні висновки – позацентричне зовнішнє шліфування втулок з матеріалу «реліт» шліфувальним кругом 1 500×150×305 54CP40N7V на високопродуктивних поєднаннях параметрів режиму шліфування ($V_k = 35$ м/с, $V_D = 2$ м/с, $t = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м, $V_{пр} = 8,4$ м/с ($\alpha = 4^\circ$)) не забезпечує вимоги шорсткості поверхні ($R_a \leq 1,25$ мкм), що пред'являється кресленням деталі. При цьому поєднанні параметрів режиму позацентричного шліфування досягається шорсткість поверхні $R_a = 2,5 \dots 3,2$ мкм, а на шліфованих поверхнях втулок були зафіксовані хаотично розташовані глибокі риски на композитному шарі, утворені вирваними окремими

зернами або блоками зерен з робочої поверхні шліфувального круга. У той же час аналіз показав, що композитний матеріал «реліт» мало вивчений, в літературі відсутні дані по його оброблюваності, що не дозволяє нормативно призначати характеристику абразивного інструменту та параметри режиму шліфування, що забезпечують необхідні параметри якості поверхні, що шліфується.

Висновки до розділу 1

Під час проведення літературного огляду за обраною тематикою були зроблені наступні висновки.

1. На даний час відсутні дослідження щодо моделювання і аналітичного опису основних контактних явищ в зоні різання при позацентровому шліфуванні виробів з композитного матеріалу «реліт», що визначають показники якості шліфованої поверхні.

2. Забезпечення необхідної шорсткості поверхні при позацентровому шліфуванні втулок з композитного матеріалу «реліт» не містять наукового обґрунтування рекомендованого поєднання параметрів режиму шліфування.

3. Відсутні нормативні керівні матеріали щодо призначення параметрів режиму позацентрового шліфування виробів з композитного матеріалу «реліт», що забезпечують необхідні показники якості при максимальній ефективності процесу обробки.

Отже, **мета дослідження** – технологічне забезпечення необхідної шорсткості поверхні при позацентровому зовнішньому шліфуванні деталей з двокомпонентного високоствердого матеріалу «реліт» із найбільшою ефективністю на основі контактної взаємодії шліфувального інструменту і заготовки. **Об'єктом** розробки є технологічний процес позацентрового зовнішнього шліфування, а **предметом** – взаємозв'язок шорсткості обробленої поверхні із технологічними характеристиками процесу обробки втулки підшипника ковзання.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. Провести аналіз технологічних проблем і особливостей забезпечення показників якості поверхні при позацентровому шліфуванні деталей з двокомпонентного високотвердого композитного матеріалу «реліт».

2. Провести експериментальне дослідження складових сили різання, середньоконтактної температури, шорсткості поверхні із технологічними умовами процесу позацентрового зовнішнього шліфування.

3. Визначити оптимальне поєднання режимів при позацентровому шліфуванні втулок з композитного матеріалу «реліт» за критерієм «максимальна продуктивність».

4. Приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обладнання та інструмент

Експериментальні дослідження здійснювалися на позацентрово-шліфувальному верстаті, широко поширеному в промисловості, моделі ЗМІ84И (рисунк 2.1)

При проведенні експериментів на універсальному позацентрово-шліфувальному верстаті використовувався шліфувальний круг 1 500×150×305 54С Р40 N7V35А. Вибір наведеної характеристики круга обумовлений необхідністю одночасного шліфування за один прохід високотвердого матеріалу «реліт» і конструкційної сталі, що залишилася при отриманні заготовки втулки. Для цих умов доцільно використовувати карбідокремнієві круги (54С) на керамічній зв'язці (V) середньої твердості (N). Для запобігання засалювання круга в процесі шліфування рекомендується використовувати відкриту структуру круга з номером 7 [32].

Перед установкою на шпindel верстата круг статично балансувався разом з планшайбою на лінійках. Правка абразивного інструменту здійснювалася алмазно-металевим олівцем при наступних режимах: поперечна глибина 0,01...0,03 мм/хід, поздовжня подача інструменту 0,1...0,3 м/хв, число проходів за правку 2...3 [33].

2.2 Зразки для проведення експериментів

Експериментальні дослідження проводилися на зразках і натурних виробках – втулках з матеріалу «реліт». Перед проведенням експерименту всі зразки піддавалися попередньому позацентровому шліфуванню зі зніманням припуску на сторону 0,08...0,1 мм з інтенсивною подачею в зону обробки MOP.

Практичне дослідження силових характеристик при позацентровому шліфуванні та чистоти шліфованої поверхні відбувалося на зразках, конструкція і розміри яких наведені на рисунку 2.2.

2.3 Характеристики, що досліджувалися

З метою встановлення технологічних можливостей процесу позацентрового шліфування карбідокремнієвим абразивним інструментом нами досліджувалися наступні його характеристики:

- тангенціальна складова сила різання P_z при шліфуванні;
- середньоконтактна температура $\bar{\theta}$ в зоні різання при шліфуванні;
- шорсткість поверхні за параметром R_a після шліфування.

Операції шліфування виконувалися з рясною подачею охолоджуючої рідини Укрінол-1М в зону обробки. Експерименти проводились на основі теорії статистичного планування експерименту і обробки результатів [34].

2.4 Послідовність проведення досліджень

Дослідження проводилися на зразках деталей «втулка захисна» з матеріалу «реліт». Дослідження характеристик процесу позацентрового шліфування проводилося при постановці повного факторного експерименту від наступних незалежних змінних: колової швидкості деталі V_D і глибини шліфування t . Були прийняті наступні діапазони варіювання змінних:

- глибина $t = (0,01 \dots 0,05) \cdot 10^{-3}$ м;
- колова швидкість деталі $V_D = 60 \dots 120$ м/хв;
- швидкість поздовжньої подачі $V_{пр} = 4,2 \dots 8,4$ м/хв.

Після проведення експериментів по вимірюванню R_z і $\bar{\theta}$ для відповідних поєднань параметрів режиму шліфування, вимірювалася шорсткість R_a поверхні втулки.

2.5 Вимірювання тангенціальної складової сили різання

Для забезпечення стабільного процесу обробки виробів, що забезпечують необхідну якість обробки, необхідно провести комплексне експериментальне дослідження силових характеристик процесу обробки підшипникових втулок і проаналізувати динаміку зміни силових характеристик. Унаслідок специфічного базування деталі при позацентровому шліфуванні (за оброблюваною поверхнею), застосування традиційних методик вимірювання сил різання в зоні обробки, не представляється можливим [55].

Тому нами використовувалося непряме визначення складової сили різання R_z через вимірювання споживаної процесом шліфування потужності електродвигуна приводу обертання шліфувального круга. Для визначення потужності, що витрачається на шліфування, потрібно встановити різницю ефективних потужностей приводу круга між різанням в процесі шліфування і холостим ходом верстата.

Для визначення потужності за допомогою цифрового амперметра моделі Fluke-902 (рисунок 2.3) вимірювалося значення сили струму в фазі приводного електродвигуна.

При відомій напрузі в мережі, і прийнятою схемою підключення електродвигуна приводу шліфувального круга до трифазної мережі, проводився розрахунок потужності витрачається на шліфування і холостий хід при наступних вихідних даних:

- лінійна напруга в мережі $U = 380$ В (фазна напруга $U_{\phi} = 220$ В);
- навантаження для мережі симетричне.

Експериментальні дослідження сили струму I_{ϕ} і розрахункове значення $N_{\text{еф}}$ при постановці ПФЕ наводяться у розділі 4.

На основі отриманих експериментальних даних, розраховувалася ефективна потужність $N_{\text{еф}}$ в симетричній трифазній мережі, що витрачається на шліфування з виразу:

$$N_{\text{еф}} = N - N_{\text{хх}}, \quad (2.1)$$

де $N = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi$;

$$\varphi = \frac{2}{3} \pi;$$

$N_{\text{хх}}$ – потужність холостого ходу верстата.

Знаючи потужність, затрачену на шліфування, складова сили різання P_z , визначалася з виразу:

$$P_z = N_{\text{эф}} / V_k, \quad (2.2)$$

де V_k – швидкість абразивного різання, м/с.

2.6 Вимірювання температури

Оцінка теплової напруженості процесу мезацентрального шліфування здійснювалася за допомогою спеціально розробленого пристосування, в якому були застосовані дві напівітпунні термопари. Схема спроектованого пристосування використаного при проведенні експерименту, наведена на рисунку 2.4.

Основою пристосування є досліджуваний зразок. Шліфувана деталь розрізається на дві складові частини 4 і 5, торці яких шліфувалися і доводилися. Штучні термоелектроди 6, виготовлені з провідників хромелю розміром 0,01.. 0,02 мм, затискалися між ними, і ізолювалися від складових частин 4 та 5 фторопластовою плівкою 11, товщиною 0,01...0,02 мм. Для запобігання зсуву частини зразка при складанні штифтувалися штифтами 10, з торців складових частин. Між собою половинки деталі стягувалися гайкою 2 через шайбу 3. Виводи термоелектродів 9, ізолювані між собою і корпусом діелектричними трубками, проходили через отвір в центрі корпусу 1 і підключалися до цифрового осцилографу RIGOLDS-6104 через струмознімач 8. За один оборот деталі, кожен термоелектрод давав сигнал в момент його проходження зони контакту зразка і шліфувального круга. Сигнал від кожної термопари був різнополярний пропорційний температурі усталеній в зоні шліфування.

Тарування пристосування проводилася шляхом попереднього шліфування (для отримання термоспар) і подальшого його приміщення в електричну шафу і послідовного доведення його температури до певних температур. Кожна усталена температура (відповідна певній ЕРС) фіксувалася і проводився запис зсуву променя осцилографа від положення променя відповідного кімнатній температурі (20°C). За отриманим тарувальним графіком проводиться переклад значень термоЕРС в фактичні значення температур при проведенні експериментів. Дані про результати вимірювання середньоконтактної температури занесені в зведену таблицю розділу 3.

На рисунку 2.5 наведено приклад запису осцилограми термоЕРС на цифровому осцилографі RIGOL DS-6104.

2.7 Вимірювання шорсткості поверхні

Точність та якість оброблюваної поверхні, їх вивчення має важливе, а в більшості випадків вирішальне значення для визначення довговічності, надійності та інших експлуатаційних характеристик виробів, і найбільшою мірою визначає характер явищ, що відбуваються в зоні контакту деталі і ріжучого інструменту.

Досліджуваним об'єктом в нашій роботі є релітова втулка підшипника ковзання зануреного насосу, до параметрів розмірів і форми, а також до шорсткості зовнішньої циліндричної поверхні, якій пред'являються підвищені вимоги: $\varnothing 30\text{с}8(-0,110_{-0,143})$; радіальне биття зовнішньої поверхні щодо осі внутрішнього діаметра не більше 0,04 мм, R_a 1,25. Найбільш важливі параметри якості, які мають забезпечуватись при шліфуванні карбідокремнієвим абразивним інструментом, досліджувалися нами, за допомогою стандартних атестованих засобів контролю та вимірювання.

Вимірювання точності зовнішнього діаметра здійснювалося за допомогою важільного індикаторного мікрометра, моделі МРІ 25-50, з точністю вимірювання 0,001 мм, радіальне биття вимірювалося за допомогою пристосування для контролю радіального биття моделі ББ-7714, якість зовнішньої поверхні встановлювалося за загальноприйнятою методикою вимірювання шорсткості профілометром моделі Ma Surf PS-1.

Висновки до розділу 2

Запропоновано методику досліджень позацентрового шліфування релітової втулки насосу для голиву (силових і температурних характеристик, шорсткості). Визначено обладнання, інструмент. Описані експериментальні зразки, функціональні та вихідні характеристики обробки. Наведено методику вимірювання тангенціальної складової сили різання P_z , середньоконтактної температури $\bar{\theta}$, а також шорсткості поверхні R_a .

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Аналіз результатів експерименту

Оптимізація процесу шліфування вимагає побудови математичних моделей для визначення впливу керованих технологічних параметрів на основні показники в при шліфуванні. На підставі цього була сформована задача в отриманні емпіричних залежностей для знаходження складової сили різання P_z , середньоконтактної температури різання $\bar{\theta}$, середньоарифметичної висоти нерівності поверхонь R_a при позацентровому шліфуванні матеріалу «реліт» від керованих параметрів режиму шліфування.

Визначення емпіричних математичних моделей аналізованих характеристик процесу обробки відбувалося на основі повного факторного експерименту [34, 36]. В експериментальних процесах істотне значення займали статистичний аналіз результатів дослідження, розрахунок проводився в програмному забезпеченні математичних продуктів MathCAD, Microsoft Excel для знаходження адекватних емпіричних залежностей.

На підставі попередніх експериментів і досліді проведених досліджень [34, 37] для виявлення закономірностей силових, температурних характеристик і шорсткості поверхні від параметрів режиму шліфування була прийнята функціональна залежність:

$$P_z, \bar{\theta}, R_a = c \cdot t^\alpha \cdot V_D^\beta \cdot V_{пр}^\gamma \quad (3.1)$$

де c, α, β, γ – коефіцієнти та показники ступеня.

У якості незалежних параметрів для знаходження закономірностей були прийняті: глибина різання t , мм; головна швидкість деталі V_D , м/хв; поздовжня швидкість виробу $V_{пр}$, м/хв.

Прологарифмувавши вираз і ввівши параметри, що враховують взаємодію змінних, (3.1) перетворюється в:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.2)$$

де y – чисельне значення в логарифмічному масштабі параметра, що визначається;

x_1, x_2, x_3 – відповідно кодоване значення змінних $t, V_D, V_{пр}$;

$b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{123}$ – показники рівняння.

Рівні варіювання та діапазони змінних наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Рівні та діапазони варіювання змінних

Рівні змінних	Діапазони варіювання змінних					
	$t, \text{мм}$		$V_D, \text{м/хв}$		$V_{пр}, \text{м/хв}$	
	x_1	$\ln x_1$	x_2	$\ln x_2$	x_3	$\ln x_3$
Верхній +1	0,05	-2,99	120	4,79	8,4	2,13
Нижній -1	0,01	-4,61	60	4,09	4,2	1,47
Основний 0	0,03	-3,51	90	4,50	6,3	1,84
Інтервал варіювання Δx_i	0,02		30		2,1	

Для перерахунку кодованих параметрів експерименту застосовувались наступні співвідношення [36]:

$$x_1 = \frac{2(\ln t - \ln 0,05)}{\ln 0,05 - \ln 0,01} + 1; \quad x_2 = \frac{2(\ln V_D - \ln 120)}{\ln 120 - \ln 60} + 1; \quad x_3 = \frac{2(\ln V_{пр} - \ln 8,4)}{\ln 8,4 - \ln 4,2} + 1.$$

На основі способу постановки експерименту в кодованому вигляді була отримана матриця варіювання фактичної величини параметрів обробки, яка є планом повного факторного експерименту типу 2^3 , зведена до таблиці 3.2.

Параметри регресії знаходились за виразом:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j, \quad (3.3)$$

де j – номер дослідю;

i – номер фактору;

N – кількість проведених дослідюв;

x_{ij} – закодоване значення фактору i в j -му дослідю;

\bar{y}_j – середня арифметична величина параметра оптимізації;

Таблиця 3.2 – План експерименту типу 2^3

№ точки плану	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-	-	+	-
3	+	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	+	-	+	+	-	-
6	+	-	+	-	-	-	-	+
7	+	+	-	-	+	+	+	+
8	+	-	-	-	+	-	-	-

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (3.4)$$

де u – номер паралельного дослідю;

n – число паралельних дослідюв;

y_{ju} – значення параметра оптимізації в u -у паралельному дослідю j -го рядка матриці.

Значимість параметрів моделі перевірялася двома методами:

1) за допомогою критерію Стюдента – t , при 5 відсотковій величині значущості;

2) методом порівняння отриманої величини параметра з довірчим інтервалом.

Для перевірки значущості параметрів за першим способом обчислювався t_p – критерій за виразом:

$$t_p = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}}, \quad (3.5)$$

і порівнювався з табличним t_T . Параметр значущий, якщо $t_p > t_T$ для встановленого рівня значущості і кількості ступенів вільності. Якщо коефіцієнти за статистикою були незначними то вони виключалися з рівняння.

Для визначення значущості коефіцієнтів за другим способом при визначенні довірчого інтервалу знаходилася дисперсія коефіцієнтів регресії:

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{nN} s_y^2, \quad (3.6)$$

де s_y – дисперсія повторюваності експерименту:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N s_j^2, \quad (3.7)$$

де s_j^2 – порядкова дисперсія:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=0}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2. \quad (3.8)$$

Довірчий інтервал Δb_i визначається за формулою:

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\}, \quad (3.9)$$

де t_T – значення критерію Стюдента з таблиць, при обраному рівні значущості та кількості ступеня вільності f , з рівномірним дублюванням дослідів, $f = (n-1)N$;

$s\{b_i\}$ – помилка у визначенні i -го коефіцієнта регресії:

$$s\{b_i\} = \sqrt{s^2\{b_i\}}. \quad (3.10)$$

Параметр значущий, якщо його знайдена величина більше довірчого інтервалу. При наступному кроці визначається дисперсія адекватності за виразом:

$$s_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (3.11)$$

де y_j – значення коефіцієнта оптимізації, що визначається за моделлю для умов j -го досвіду;

k – число змінних.

Гіпотеза отриманої моделі перевірялася на адекватність за F -критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}. \quad (3.12)$$

Якщо значення $F_p \leq F_T$ для прийнятого рівня значущості і відповідних їм чисел ступенів вільності, то модель вважалася адекватною. При $F_p > F_T$ гіпотеза адекватності відкидалася.

На підставі проведеного повного факторного експерименту, отримані значення складової сили різання P_z , значення середньої температури $\bar{\theta}$ в зоні контакту, і параметра шорсткості поверхні R_a наведені в таблиці 3.3. За методикою викладеною вище отримані наступні експериментальні математичні моделі для керуючих параметрів обробки і вихідних характеристик при шліфуванні втулок з матеріалу «реліт».

$$\ln P_z = 9,73 + 2,9 \ln t + 0,97 \ln V_D, \quad (3.13)$$

$$\ln \bar{\theta} = 2,55 \ln V_D + 0,53 \ln t - 1,08 \ln t - 2,06; \quad (3.14)$$

$$\ln R_a = 0,885 + \ln t \cdot (1,714 - 0,307 \ln V_D) + \ln V_D \cdot (0,053 - 0,397 \ln V_{np}) + 1,967 \ln V_{np}. \quad (3.15)$$

Після перетворення виразів отримаємо:

$$P_z = 16814,6 \cdot t^{2,9} \cdot V_D^{0,97}, \text{ Н}; \quad (3.16)$$

$$\bar{\theta} = 0,1032 \cdot t^{0,53 V_D - 1,08} \cdot V_D^{2,25}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.17)$$

$$R_a = 2,42 \cdot t^{(1,714 - 0,307 \ln V_D)} \cdot V_D^{(0,053 - 0,397 \ln V_{np})} \cdot V_{np}^{1,967}, \text{ МкМ}. \quad (3.18)$$

Таблиця 3.3 – Результати експериментального вимірювання P_z , $\bar{\theta}$ та R_a .

№ досліду	t, мм	V_D , м/хв	V_{np} , м/хв	I, А	$N_{эф}$, Вт	P_z , Н	$\bar{\theta}$, $^\circ\text{C}$	R_a , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1	0,05	120	8,4	54,5	10370,5	396,3	219	1,8
1.2	0,05	120	8,4	53,4	10153,5	390,1	237	1,78
1.3	0,05	120	8,4	54,4	10349,5	395,7	215	1,79
2.1	0,01	120	8,4	0,5	98	2,8	22	1,72
2.2	0,01	120	8,4	0,6	108,5	3,1	24	1,75
2.3	0,01	120	8,4	0,5	91	2,6	26	1,63
3.1	0,05	60	8,4	27,2	5166	247,6	115	1,14
3.2	0,05	60	8,4	27,3	5187	208,2	110	1,18
3.3	0,05	60	8,4	27,6	5253,5	190,1	105	1,28
4.1	0,01	60	8,4	0,2	45,5	1,3	21	1,18
4.2	0,01	60	8,4	0,2	35	1,1	23	1,15
4.3	0,01	60	8,4	0,2	42	1,2	25	1,11
5.1	0,05	120	4,2	53,4	10160,5	390,3	239	1,67

Продовження 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.2	0,05	120	4,2	53,7	10209,5	371,7	201	1,52
5.3	0,05	120	4,2	54,5	10328,5	405,1	205	1,68
6.1	0,01	120	4,2	0,4	84	2,4	24	1,37
6.2	0,01	120	4,2	0,5	87,5	2,5	27	1,35
6.3	0,01	120	4,2	0,5	91	2,8	23	1,25
7.1	0,05	60	4,2	27,6	5239,5	179,7	101	0,54
7.2	0,05	60	4,2	26,4	5012	243,2	108	0,75
7.3	0,05	60	4,2	27,3	5183,5	218,1	120	0,88
8.1	0,01	60	4,2	0,2	35	1,5	23	0,61
8.2	0,01	60	4,2	0,3	59,5	1,6	25	0,54
8.3	0,01	60	4,2	0,2	45,5	1,8	24	0,61

Порівняння розрахункових значень досліджуваних характеристик P_z , P_y , $\bar{\theta}$, отриманих аналітично і експериментально, приведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення відповідних складових P_z , P_y сил різання і $\bar{\theta}$ при позакентровому шліфуванні отриманих експериментально і аналітично.

Параметри режиму шліфування			Результат аналітичного розрахунку			Результат експерименту		
t , мм	V_D , м/хв	$V_{пр}$, м/хв	P_z , Н	P_y , Н	$\bar{\theta}$, °С	P_z , Н	P_y , Н	$\bar{\theta}$, °С
0,05	120	8,4	292,64	671,84	258,9	394,03	904,61	223,7
0,01	120	8,4	2,41	5,54	25	2,83	6,50	24,00
0,05	60	8,4	150,38	345,25	133,1	215,3	494,28	110
0,01	60	8,4	1,24	2,85	25	1,20	2,75	23,00
0,05	120	4,2	292,64	671,84	258,9	389,03	893,13	215
0,01	120	4,2	2,41	5,54	25	2,57	5,90	24,67
0,05	60	4,2	150,38	345,25	133,1	213,7	490,61	109,7
0,01	60	4,2	1,24	2,85	25	1,63	3,74	24,00

Сила різання, отримана експериментальним шляхом при максимальному поєднанні параметрів режиму шліфування, склала 394,03 Н, а теоретичні розрахунки показали 292,64 Н, таким чином, відносна похибка проведення випробування становила:

$$\Delta_{P_z} = \frac{(P_{z \text{ практ}} - P_{z \text{ теор}})}{P_{z \text{ практ}}} \cdot 100\%, \quad (3.19)$$

$$\Delta_{P_z} = \frac{(394,03 - 292,64)}{394,03} \cdot 100\% = 26\%.$$

Середньоконтактна температура отримана експериментальним шляхом при максимальному поєднанні параметрів режиму шліфування склала 268°C, а теоретичні розрахунки показали 223,7°C, таким чином, відносна похибка проведення випробування становила:

$$\Delta_{\theta} = \frac{(\bar{\theta}_{\text{практ}} - \bar{\theta}_{\text{теор}})}{\bar{\theta}_{\text{практ}}} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

$$\Delta_{\theta} = \frac{(258 - 223,7)}{258} \cdot 100\% = 13\%.$$

Відносна похибка між аналітичним розрахунком і експериментом в залежності від різних поєднань варіюваних параметрів режиму обробки складає від 15 до 35%.

3.2 Оптимізація параметрів режиму позacentрового шліфування

Однією з найважливіших завдань будь-якого машинобудівного підприємства є підвищення ефективності процесів. Одним із способів вирішення поставленого завдання, є забезпечення більш високої продуктивності з одночасним забезпеченням

необхідної якості вироблених деталей. В даний час на підприємствах забезпечення необхідної якості виготовлених деталей недостатньо науково обгрунтовано, що призводить як до невиправдано завищених вимог за цими параметрами, що призводить до збільшення собівартості виготовлених деталей, так і до зниження вимог, в наслідок чого зменшується експлуатаційна довговічність виробів.

Раніше проводилося безліч наукових досліджень по встановленню раціонального поєднання параметрів якості виготовлених деталей, які на достатньому рівні визначали їх експлуатаційні властивості, зокрема у роботах [17, 26, 38, 39, 40-45] та ін. Було проведено комплексний аналіз різних факторів, які могли вплинути на параметри якості деталей машин, визначені взаємодії параметрів між собою для різних способів обробки, встановлені напрямки керування якістю виробів.

Однією з найважливіших умов, яка вирішується при розробці технологічних операцій і процесів при виготовленні деталей, є забезпечення необхідної якості оброблюваної поверхні при максимально можливій ефективності обробки. Можливим шляхом підвищення продуктивності є вибір поєднань параметрів режиму обробки, що забезпечують максимальну ефективність, але не погіршуючих параметри якості. У зв'язку з тим актуальні дослідження з визначення оптимальних параметрів режиму позacentрового шліфування, що забезпечують необхідні показники якості оброблених деталей з максимальною ефективністю обробки.

Рівень сучасного машинобудування, що характеризується повсюдним освоєнням нових конструкційних і інструментальних матеріалів, високопродуктивних методів обробки і систем адаптивного керування процесом виробництва, висуває принципово нові умови щодо проектування та розроблення технологічних систем. Успіх реалізації цих вимог тісно пов'язаний із застосуванням знань по оптимізації прийнятих проектних рішень. Найбільш поширеним в даний час методом оптимізації є метод ітеративної побудови рішення, який дозволяє врахувати чинні при шліфуванні обмеження, здійснити оптимізацію керованих параметрів режиму позacentрового шліфування і їх поєднань за критерієм максимальної ефективності.

Отримаємо оптимізаційну математичну модель із знаходженням параметра оптимальності – мінімальний штучний час обробки (максимальна продуктивність).

Продуктивність операції знаходиться з виразу:

$$\Pi = \frac{1}{t_{\text{шт.р}}}, \quad (3.21)$$

де $t_{\text{шт.р}}$ – штучний час обробки, що залежить від керованих параметрів режиму позацентрального шліфування:

$$t_{\text{шт.р}} = t_{\text{м}} + t_{\text{пр}}, \quad (3.22)$$

$$t_{\text{м}} = \frac{1 + B_{\text{к}}}{V_{\text{пр}} \cdot 10^3}, \quad (3.23)$$

$$t_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} \cdot t_{\text{м}}, \quad (3.24)$$

де $t_{\text{м}}$ – машинний час, хв;

$t_{\text{пр}}$ – час правки шліфувального круга, приведений до однієї деталі, хв;

l – осьовий розмір втулки, мм;

$B_{\text{к}}$ – висота шліфувального круга, мм;

$T_{\text{пр}}$ – час правки шліфувального круга, хв;

T – період стійкості круга, хв.

Критерій оптимізації F для позацентрального шліфування втулок матиме вигляд [46]:

$$F(V_{\text{пр}}) = t_{\text{шт.р}} = \frac{1 + B_{\text{к}}}{V_{\text{пр}} \cdot 10^3} \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{пр}}}{T} \right). \quad (3.25)$$

Тоді задача оптимізації параметрів позацентрового шліфування може бути представлена як мінімізація цільової функції ($F(V_{пр}) \rightarrow \min$), в яку параметр режиму шліфування $V_{пр}$ (керований) входить у явному вигляді. Аналіз виразу (3.25) показує, що цільова функція $F(V_{пр})$ приймає мінімальні значення при максимальному значенні $V_{пр}$.

При позацентровому шліфуванні втулок з матеріалу «реліт» приймемо такі обмеження: на діапазони зміни параметрів режиму шліфування при обробці поверхні, по максимально допустимій глибині обробки $[t_{\max}]$, по максимально допустимій шорсткості поверхні, що шліфується $R_{a \text{ доп}}$, які представляються у вигляді системи нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} V_{D \min} \leq V_D \leq V_{D \max} \\ V_{пр \min} \leq V_{пр} \leq V_{пр \max} \\ t_{\min} \leq t \leq [t_{\max}] \\ R_a(V_D, V_{пр}, t) \leq R_{a \text{ доп}} \end{cases}, \quad (3.26)$$

де $V_{D \min}$, $V_{D \max}$, $V_{пр \min}$, $V_{пр \max}$, t_{\min} , $[t_{\max}]$ – граничні величини швидкості подачі і глибини шліфування, що обмежуються технічними параметрами обладнання та інструменту.

Технічні обмеження на керовані характеристики режиму обробки V_D , $V_{пр}$ задаються діапазонами їх зміни і наводяться в таблиці 3.1, а обмеження по шорсткості поверхні береться не більше 1,25 мкм відповідно до вимог конструкторської документації втулки.

Математична модель оптимізації режимів позацентрового шліфування включала технічні обмеження на діапазони зміни параметрів режиму шліфування, за гранично допустимею глибиною шліфування, за гранично допустимою шорсткістю обробленої поверхні і доповнено прийнятим критерієм

оптимальності – максимальна продуктивність (мінімальний штучний час), і мала вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \leq V_D \leq 120 \\ 4,2 \leq V_{np} \leq 8,4 \\ 0,01 \leq t \leq \bar{r} - \sqrt{\frac{H_{V1} \bar{R} - \frac{1}{[P_i]} \cdot \frac{0,135 H_{V1} H_{V2} \bar{R} K_\delta K_B d_a^{2,5} \psi(\xi, \eta, \gamma) V_K V_D \sqrt{d + D}}{(V_K + V_D)^2 + V_{np}^2} \sqrt{\frac{d + D}{4L}}}{2(H_{V1} - H_{V2})}}; \quad (3.27) \\ 2,42 \cdot t^{(1,714 - 0,307 \ln V_D)} \cdot V_D^{(0,053 - 0,397 \ln V_{np})} \cdot V_{np}^{-1,917} \leq 1,25 \end{array} \right.$$

$$r(V_{np}) = \min \left[\frac{1 + P_k}{V_{np} \cdot 10^3} \cdot \left(1 + \frac{T_{np}}{T} \right) \right]. \quad (3.28)$$

Вирішуючи приведену модель на ПК за допомогою математичного програмного забезпечення (MathCAD) отримаємо графічні результати рішень у вигляді рівня допустимих значень поєднань параметрів V_D і t при постійному значенні V_{np} . Вкажемо на них точки оптимальності $V_{D\text{opt}}$ і t_{opt} , при яких час обробки приймає мінімальне значення (рисунок 3.1, а, б).

Відповідно до знайдених оптимальних поєднань параметрів режиму позacentрового шліфування при максимальній ефективності процесу обробки, і на підставі функціональної залежності для технічного параметра шорсткості поверхні отримаємо діапазони забезпечення необхідного параметра шорсткості поверхні (рисунок 3.2, а-г).

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Висновки до розділу 3

1 Проведено повний факторний експеримент з дослідження силових і температурних характеристик, шорсткості поверхні. На підставі математичної обробки результатів ПФЕ отримані емпіричні математичні моделі для розрахунку тангенціальної складової сили різання P_z , середньоконтактної температури θ , шорсткості поверхні R_a .

2 Визначена математична модель для оптимізації параметрів режиму позацентрового шліфування за критерієм максимальної ефективності процесу обробки (найменшого істучного часу).

3 Встановлено раціональні поєднання параметрів режиму позацентрового шліфування при заданих обмеженнях за рівнями змін режимів шліфування і необхідної шорсткості оброблюваної поверхні $R_{a, \text{дл}}$, при яких функція витрат часу прагне до мінімуму.

4 Побудовано діаграми забезпечення параметра R_a шорсткості поверхні від поєднання керованих параметрів режиму шліфування.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека праці під час шліфування

Шліфувальний верстат являє собою промисловий інструмент, що використовує абразивний диск для різання або видалення надлишкового матеріалу. Щорічно відбуваються нещасні випадки внаслідок використання робочого обладнання у тому числі машин. Більшість із них доволі серйозні, а деякі навіть летальні.

Шліфувальне обладнання може бути небезпечним у випадку неправильного використання. Щоб залишатися у безпеці, необхідно дотримуватися наступних порад верстатниками, а також досконало розуміти, як нею користуватися.

Основні поради під час роботи на шліфувальному верстаті:

- 1) носити відповідні засоби індивідуального захисту, у тому числі захисні окуляри, маску, взуття;
- 2) використовувати засоби захисту органів слуху, що відповідають рівню шуму, який буде поширюватися від обладнання;
- 3) працювати на обладнанні із використанням місцевої витяжної вентиляції;
- 4) використовувати засоби захисту органів дихання;
- 5) на початку експлуатації верстату перевірити абразивні стрічки шліфувального верстату та замінити їх у разі суттєвого зносу;
- 6) тримати руки та пальці подалі від абразивної поверхні шліфувальної машини;
- 7) переконатися, що абразивні стрічки мають однакову ширину зі шківом, що використовується;
- 8) барабанні, дискові або стрічкові шліфувальні машини повинні бути закриті витяжним кожухом для пилу.

Під час роботи суворо забороняється:

- 1) шліфувати дрібні предмети та утримувати оброблювану заготовку руками;
- 2) носити вільний одяг та прикраси. Обов'язково збирати волосся назад або надіти берет;
- 3) працювати на обладнанні, якщо воно не має відповідних систем захисту.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Найбільш трудомісткою і дорогою операцією технологічного маршруту виготовлення втулки є операція 025 (шліфування зовнішнього діаметра втулки алмазним кругом на круглошліфувальному напівавтоматі). Зниження трудомісткості виготовлення втулки, можливо за рахунок заміни цієї операції на операцію позacentрового шліфування, яка за її технологічними можливостями забезпечує необхідні точність і шорсткість зовнішньої поверхні деталі, раніше одержувані алмазною обробкою на круглошліфувальних верстатах.

Основними джерелами ефективності є

- підвищення продуктивності обладнання за рахунок більш повного використання його технічних можливостей;
- скорочення часу обслуговування обладнання і, як наслідок, часу виготовлення деталі;
- підвищення продуктивності за рахунок зниження відсотка браку в виробі;
- підвищення якості і точності виготовлення виробів;
- скорочення часу контролю виробів;
- скорочення втрат робочого часу і вивільнення робочих.

Визначення річного економічного ефекту ґрунтується на зіставленні приведених витрат по базовому і новому варіантам обробки.

Наведені витрати Π , грн., являють собою суму собівартості і нормативного прибутку:

$$\Pi = C + E_n \cdot K \quad (4.1)$$

де C – собівартість механічної обробки річної продукції, грн.,

E_H – галузевий нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ($E = 0,15$);

K – капітальні вкладення, грн.

Річний економічний ефект, E_p , грн., визначається по різниці приведених витрат двох варіантів:

$$E_p = \Pi_1 - \Pi_2 = C_1 - C_2 - E_H \cdot (K_2 - K_1) \quad (4.2)$$

Умовна річна економія, E_{yp} , грн.:

$$E_{yp} = C_1 - C_2 \quad (4.3)$$

Річний економічний ефект, E_p , грн.:

$$E_p = E_{yp} - E_H \cdot (K_2 - K_1) \quad (4.4)$$

де $(K_2 - K_1)$ – додаткові капітальні вкладення на впровадження заходів, грн.

Розрахуємо допоміжні показники.

Для розрахунку капітальних і поточних витрат необхідно попередньо визначити коефіцієнти використання обладнання при виконанні операції з умовним річним випуском $Q = 5000$ шт.

Розрахункова кількість верстатів:

$$S_{\text{потр}} = \frac{T_{\text{шт-к}} \cdot N}{F_{\text{до}} \cdot 60} \quad (4.5)$$

де $T_{\text{шт-к}}$ – норма штучно-калькуляційного часу, хв. Для базового і проектного варіантів вона буде складати відповідно 0,8 хв. і 0,5 хв;

$F_{\text{до}}$ – номінальний річний фонд часу (витрати номінального фонду 5%), тобто

$$F_{до} = 4140 - 4140 \cdot 0,05 = 3933 \text{ год.}$$

Тоді маємо

$$S_{розр}^{баз} = \frac{0,8 \cdot 5000}{3933 \cdot 60} = 0,02;$$

$$S_{розр}^{пр} = \frac{0,5 \cdot 5000}{3933 \cdot 60} = 0,01.$$

Кількість виробничих працівників в базовому та проектному варіантах, R , чол.:

$$R = \frac{T_{шт-к} \cdot N}{F_{др} \cdot 60 \cdot S}, \quad (4.6)$$

де $F_{др}$ – дійсний фонд часу роботи виробничого працівника, $F_{др} = 1820$ год.;

S – коефіцієнт багатостатності, $S = 1$.

Кількість вивільнених робітників, $Ч_{вр}$:

$$Ч_{вр} = R_{пр} - R_{баз}. \quad (4.7)$$

Тоді маємо

$$R_{баз} = \frac{0,8 \cdot 5000}{1820 \cdot 60 \cdot 1} = 0,04 = 1 \text{ чол.}$$

$$R_{пр} = \frac{0,5 \cdot 5000}{1820 \cdot 60 \cdot 1} = 0,02 = 1 \text{ чол.}$$

В результаті удосконалення технологічного процесу число вивільнених робітників дорівнює нулю. Розрахункова кількість верстатів зменшується на 1 внаслідок виконання операції 025 на тому ж обладнанні, що й операція 010.

Здійснено розрахунок суми капітальних вкладень за порівнюваними варіантами.

Балансова вартість обладнання, $K_{об}$, грн.:

$$K_{об} = 1,1 \cdot C_{об} \cdot S_{пр}, \quad (4.8)$$

де $C_{об}$ – вартість одиниці обладнання, грн.;

$S_{пр}$ – прийняте число верстатів на операції, що аналізується;

1,1 – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж.

Вартість обладнання наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вартість обладнання базового і проектного технологічних процесів виготовлення втулки

№ опер.	Базовий		Проектний	
	Найменування, кількість	Вартість, грн.	Найменування, кількість	Вартість грн.
005	1К62, 1 шт.	45000	1К62, 1 шт.	45000
010	3М184И, 1 шт.	100000	3М184И, 1 шт.	100000
015	СВ141П, 1 шт.	140000	СВ141П, 1 шт.	140000
020				
025	1К12, 1 шт.	32000	див. сл. 010	-
030	7520, 1 шт.	160000	7520, 1 шт.	160000
Вартість верстатів		477000	-	445000
Вартість виробничого обладнання		487000	-	455000

Вартість виробничого обладнання буде складатися із сумарної вартості контрольно-вимірювальних пристроїв (КВП) та вартості обладнання для обробки деталей. Вартість КВП складає орієнтовно 10000 грн.

Вартість енергетичного обладнання у цеху можна прийняти рівною 6%, підйомно-транспортного обладнання – 10%, засобів контролю та керування – 15%, інструментів та пристроїв – 12% та господарського і виробничого інвентарю – 5% від загальної вартості виробничого обладнання (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 Вартість обладнання та підтримки за видами

№ з. п.	Найменування, частка у виробничому обладнанні	Базовий (вартість, грн.)	Проектний (вартість, грн.)
1	Енергетичне обладнання, 6%	29220	27300
2	Підйомно-транспортне обладнання – 10%,	48700	45500
3	Засоби контролю та керування, 15%	73050	68250
4	Інструменти та пристрої, 12%	58440	54600
5	Господарський і виробничий інвентар, 5%	24350	22750
6	Модернізація обладнання, 3% від вартості верстатів	14310	13350
7	Монтаж і налагодження, 3%	14610	13650
8	Проектні роботи, 2%	9740	9100
	Усього	272420	254500
	Усього з урахуванням виробничого обладнання	759420	709500

Вартість виробничої, допоміжної та службово-побутової площ, $K_{пл}$, грн.:

$$K_{пл} = C_{пл} \cdot F_{об} \cdot \gamma \cdot S_{пр} + C_{пл.поб} \cdot F_{поб} \cdot R, \quad (4.9)$$

де $C_{пл}$ – вартість квадратного метру виробничої площі, $C_{пл} = 20000$ грн.;

$F_{об}$ – площа, яку займає обладнання, m^2 ;

γ – коефіцієнт додаткової площі, $\gamma = 1,1$;

$S_{\text{пр}}$ – прийнята кількість верстатів, шт.;

$C_{\text{пл.поб}}$ – вартість квадратного метру службово-побутової площі,

$C_{\text{пл.поб}} = 26000$ грн.;

$F_{\text{поб}}$ – площа службово-побутових приміщень, на одного робітника, $F_{\text{поб}} = 7 \text{ м}^2$;

R – кількість виробничих працівників, чел.

Отже, маємо за варіантами

$$K_{\text{пл}}^{\text{баз}} = 20000 \cdot 6 \cdot 1,1 \cdot 5 + 26000 \cdot 7 \cdot 1 = 842000 \text{ грн.},$$

$$K_{\text{пл}}^{\text{розр}} = 20000 \cdot 6 \cdot 1,1 \cdot 4 + 26000 \cdot 7 \cdot 1 = 710000 \text{ грн.}$$

Капітальні вкладення за порівнюваними варіантами:

$$K_1 = 759420 + 842000 = 1601420 \text{ грн.}$$

$$K_2 = 709500 + 710000 = 1419500 \text{ грн.}$$

Витрати, Z , грн, на основну та допоміжну заробітну плату з відрахуваннями:

$$Z = P_{\text{від}} \cdot K \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{дод}} \cdot K_{\text{соц}} \quad (4.10)$$

де $P_{\text{від}}$ – відрядна розцінка за операцію, грн.;

$$P_{\text{від}} = T_{\text{верст}} \cdot T_{\text{шт-к}} / 60, \quad (4.11)$$

де $T_{\text{верст}}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду робіт, грн.,

$$T_{\text{верст}}^V = 1,55 \cdot 55,83 = 86,5 \text{ грн.}; \quad T_{\text{верст}}^{IV} = 1,35 \cdot 55,83 = 75,37 \text{ грн.};$$

$T_{шт-к}$ – штучно-калькуляційний час, хв.;

N – річний випуск деталей, шт.;

$K_{пр}$ – коефіцієнт приробітку, $K_{пр} = 1,4$;

$K_{дод}$ – коефіцієнт додаткової заробітної плати, $K_{дод} = 1,18$;

$K_{соц}$ – коефіцієнт відрахувань на соціальні потреби, $K_{соц} = 1,2$.

Отже, маємо

$$З_{баз} = \frac{86,5 \cdot 0,8}{60} \cdot 5000 \cdot 1,4 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 11431,8 \text{ грн.};$$

$$З_{розр} = \frac{75,4 \cdot 0,5}{60} \cdot 5000 \cdot 1,4 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 6228,04 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію технологічного обладнання, A , грн.:

$$A = K_{об} \cdot a / 100, \quad (4.12)$$

де a – норма амортизаційних відрахувань, що встановлюється виходячи з терміну корисного користування 20 років, $a = 20\%$

Отже, маємо

$$A_{баз} = 477000 \cdot 0,2 = 95400 \text{ грн.};$$

$$A_{розр} = 445000 \cdot 0,2 = 89000 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт та утримання площ, $З_{пл}$, грн.:

$$З_{пл} = H_{пл} \cdot (F_{об} \cdot S_{пр} \cdot 1,1 + F_{ноб} \cdot R), \quad (4.13)$$

де $N_{пл}$ – норматив витрат на ремонт та утримання одного квадратного метру виробничої площі та площі службово-побутових приміщень, $N_{пл} = 330$ грн.

Отже, маємо

$$Z_{пл}^{баз} = 330 \cdot (6 \cdot 5 \cdot 1,1 + 7 \cdot 1) = 13200 \text{ грн.};$$

$$Z_{пл}^{розр} = 330 \cdot (6 \cdot 4 \cdot 1,1 + 7 \cdot 1) = 11022 \text{ грн.}$$

Технологічна собівартість, C , грн., за статтями витрат на заробітну плату, амортизації технологічного обладнання та ремонту та утримання площ становитиме:

$$C_{баз} = 11431,8 + 95400 + 13200 = 120032 \text{ грн.};$$

$$C_{розр} = 6228,04 + 89000 + 11022 = 106250 \text{ грн.}$$

В таблиці 4.3 проведемо розрахунок показників економічної ефективності впровадження позацентрового шліфування на операції 025 під час виготовлення втулки захисної із композитного матеріалу для насосу.

Таблиця 4.3 – Показники економічної ефективності впровадження позацентрового шліфування

Найменування показника	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Розрахунок
1	2	3	4
Уможна річна ефективність	Грн.	$E_{ур} = C_1 - C_2$	$E_{ур} = 120032 - 106250 = 13782$
Додаткова економія капітальних витрат	Грн.	$K_d = K_1 - K_2$	$K_d = 1601420 - 1419500 = 181920$

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
Річний економічний ефект	Грн.	$E_p = E_{ур} + K_d$	$E_p = 13782 + 181920 = 195702$
Зниження собівартості операції	Грн.	$C_{з.сб} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%$	$C_{з.сб} = \frac{120032 - 106250}{120032} \cdot 100\% = 11,4\%$

4.3 Біологічні методи очищення та беззараження гною

Дані методи очищення забезпечують переведення шкідливих речовин у нерозчинну або газоподібну форму. Умови ефективного застосування біологічних способів засновані на біохімічній деструкції та мінералізації органічних речовин мікроорганізмами. Велика роль кислотності середовища у перебігові біохімічного процесу, що повинна бути у межах рН 6,5...8,5.

Аеробні процеси відбуваються при подачі до оброблюваного стоку достатньої кількості кисню, що потрібен для забезпечення життєдіяльності мікроорганізмів. У цілому до складу біоценозу активного мулу входять різноманітні групи мікроорганізмів (мезофільних, термофільних, аеробних, анаеробних). За достатності кисню і температури докілька 20...30°C в біоценозі переважають мезофільні аероби (мезофільне окислення), а за 30...40°C – термофільні (термофільне окислення). Залежно від умов процесу одна з груп мікроорганізмів може переважати, здійснюючи основний обробіток. Інші групи мікроорганізмів у цьому випадку є супутніми. Вони постачають основну групу мікроорганізмів поживними речовинами. При анаеробному процесі майже не виділяється сморід. Спосіб мікробіального розмноження більш простий та прилаштований до складу гною, що є швидкозмінним. При цьому процесі відбувається саморозігрів маси до 70°C, тобто її дезінфекція.

Якщо в оброблюваній масі розчиненого кисню недостатньо, то відбувається анаеробне бродіння. Воно може бути метановим або водневим. При температурі

маси 30...35⁰С у біоценозі переважають мезофільні анаероби, а при 50...55⁰С – термофільні. Процес супроводжується виділенням біогазу, що складається з метану, водню та двоокису вуглецю.

Окрім органічних речовин для забезпечення життєдіяльності мікроорганізмів у гнойовій жижі повинні бути і біогенні елементи (азот, фосфор, калій), яких інколи у стоках буває недостатньо. Наприклад, недостатня кількість азоту гальмує процес біохімічного окислення органічних речовин, фосфору – окрім зазначеного призводить до масового розвитку ниткових бактерій.

Необхідно знати, що одне біологічне очищення гноевих стоків не дасть достатнього ефекту. Так, після двох ступенів очищення вміст (мг/л) становить: азоту – 100, фосфору – 40, калію – 80, а кислотність рН 8,5. Це можливо пояснити тим, що на біологічних очисних спорудах біогенні елементи (азот, фосфор, калій) видаляються не більше, ніж на 20%. Доцільно додатково використовувати хімічні засоби для знезараження – формаліну, аміаку, хлороформу; осадження – ферохлориду, вапна. Застосування хімічних методів очищення та знезараження дозволяє виділити зі стоків до 90% біогенних елементів.

Отже, система утилізації гною повинна відповідати наступним умовам:

- будівництво та введення до експлуатації споруд зі зберігання та утилізації гною повинні передувати введенню в експлуатацію комплексів або ферм;
- підготовлений гній необхідно вносити у ґрунт до початку морозів великими дозами із періодичністю 2...3 роки;
- заробляти гній у ґрунт на площах, з яких можливе поверхневе стікання до відкритих водойм;
- не допускати скидання стічних вод тваринницьких комплексів у водойми незалежно від ступеня їх очищення.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто особливості безпечної праці під час шліфування.
2. В результаті розрахунків встановлена економічна доцільність впровадження позацинкового шліфування на операції 025, а саме:

- збільшення продуктивності праці;
- зниження собівартості на 11,4%;
- річний економічний ефект становить 195702 грн.

3. Розглянуто біологічні методи очищення та знезараження ґрунту.

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. Встановлено, що тимчасова нестабільність вихідних характеристик якості (шорсткості) поверхні, що шліфується, при позацентровому шліфуванні матеріалу «реліт», виникає внаслідок переходу ріжучих зерен робочої поверхні круга в режим катастрофічного зносу, що супроводжується вириванням окремих зерен або їх блоку з робочої поверхні круга.

2. Виконано комплексне експериментальне дослідження функціональних (сил різання і температури) і вихідних (шорсткості поверхні) характеристик процесу зовнішнього позацентрового шліфування втулок з матеріалу «реліт» на основі постановки повного факторного експерименту. Отримано експериментальні математичні моделі для знаходження сил різання, температури в зоні різання і шорсткості поверхні від поєднання параметрів режиму позацентрового шліфування. Результати досліджень підтвердили достовірність розрахункових виразів отриманих аналітично, з відносною похибкою 15-35%.

3. Визначено діапазони забезпечення необхідного параметра шорсткості поверхні при позацентровому шліфуванні втулок з матеріалу «реліт», що дозволяють призначити поєднання параметрів режиму позацентрового шліфування. Дані поєднання параметрів режиму позацентрового шліфування є основою для застосування при проектуванні операцій позацентрового шліфування.

4. Приділено увагу питанням безпеки праці під час виконання технологічної операції шліфуванням. У результаті розрахунків встановлена економічна доцільність впровадження позацентрового шліфування на операції 025. Річний економічний ефект становить 195702 грн. Висвітлено біологічні методи очищення та знезараження гною.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Срібнюк С. М. Насоси і насосні установки : навч. посіб. — Київ : Центр учбової літератури, 2017. — 312 с.
2. Дуганець В. І., Бендера І. М., Дідура В. А. Гідравліка : навч.-метод. комплекс. — Тернопіль : ТНТУ, 2018. — 145 с.
3. Вірченко М. І. Дослідження загурювальних насосів з мокрим електродвигуном: кваліфікаційна робота. — Суми : Сумський держ. ун-т, 2024. — 64 с.
4. Гусак А. Г. Використання малогабаритних насосних агрегатів у водопостачанні: наук. праця. — Суми : СумДУ, 2011. — 27 с.
5. Kondus V., Pavlenko I., Kulikov O., Liaposhchenko O. Development of a High-Rotational Submersible Pump for Water Supply // *Water*. — 2023. — Vol. 15, No 20. — Art. 3609. — DOI: 10.3390/w15203609.
6. Takacs G. *Electrical Submersible Pumps Manual : Design, Operations and Maintenance*. — 2nd ed. — Amsterdam : Gulf Professional Publishing, 2009. — 440 p.
7. Verde W. M., Maciel Filho R., Vecchi A. R. A critical analysis and improvements of empirical models for electrical submersible pump diagnosis // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2024. — Vol. 236. — 112239. — DOI: 10.1016/j.petrol.2023.112239.
8. Peng L., Zhang J., Xu H., Wang J. Electric submersible pump broken shaft fault diagnosis using PCA and machine learning // *Wear*. — 2020. — Vol. 450–451. — Art. 203258. — DOI: 10.1016/j.wear.2020.203258.
9. Song Y., Liu X., Wang H. Diagnosis of electrical submersible pump failure using LSTM-autoencoder // *Applied Energy*. — 2024. — Vol. 355. — Art. 121981. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121981.
10. Review of electrical-submersible pump surging correlations and models // *Journal of Petroleum Technology*. — 2015. — Vol. 67, No. 5. — P. 89–95.
11. ISO 15551-1:2015. Petroleum and natural gas industries — Downhole equipment — Part 1: Electrical submersible pump systems. — Geneva : ISO, 2015. — 34 p.

12. ISO 15551-2:2023. Petroleum and natural gas industries — Subsurface pumps — Part 2: Submersible pumps. — Geneva : ISO, 2023. — 42 p.
13. API RP 11S2. Recommended Practice for Testing of Submersible Pump Cable. — Washington, DC : API, 2016. — 25 p.
14. API RP 11S6. Recommended Practice for Testing of Submersible Pump Motor. — Washington, DC : API, 2018. — 31 p.
15. API RP 11S7. Recommended Practice for Testing of Submersible Pump System. — Washington, DC : API, 2020 — 38 p.
16. Grundfos. SP, SPE Submersible Pumps. Installation & Operation Manual. — Bjerringbro : Grundfos Holding, 2022. — 152 p.
17. Grundfos. Submersible Pumps : Technical Catalogue — Bjerringbro : Grundfos Holding, 2023. — 248 p.
18. EBARA. Submersible Pump DMLE Series. Installation, Operation and Maintenance Manual. — Tokyo : EBARA Corporation, 2020. — 56 p.
19. EBARA. Submersible Pump DLU Series. Instruction Manual — Tokyo : EBARA Corporation, 2021. — 48 p.
20. Sulzer. Submersible Pumps : Product Catalogue. — Winterthur : Sulzer Ltd., 2022. — 200 p.
21. Wilo. Submersible Pumps — Technical Data Book. — Dortmund : Wilo SE, 2021. — 130 p.
22. Xylem/Lowara. Submersible Pumps — Installation & Maintenance. — Montecchio Maggiore : Xylem Inc., 2020. — 98 p.
23. Ramesh S., Kumar A., Patel P. Performance analysis of submersible pumps under variable speed operation // International Journal of Fluid Machinery. — 2022. — Vol. 45, No. 2. — P. 115–124.
24. Chukwuekezie C., Adewale B., Olorunfemi M. Experimental study on sand-handling capability of electrical submersible pumps // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. — 2021. — Vol. 11. — P. 1497–1506.
25. Gitanji T., Bello K., Adegbite S. Multiphase flow performance of electrical submersible pumps in gas-liquid mixtures // SPE Journal. — 2020. — Vol. 25, No. 6. — P. 3039–3052.

26. Kim D., Lee J., Park H. CFD analysis of submersible pump impellers under cavitation conditions // *Energies*. — 2021. — Vol. 14, No. 15. — Art. 4602. — DOI: 10.3390/en14154602.
27. Chen Y., Zhang Q., Li W. Optimization of electrical submersible pump operation using machine learning techniques // *Energy*. — 2023. — Vol. 278. — Art. 127908.
28. Lin C., Wu Z., Huang J. Fault detection of submersible pumps using deep learning with vibration signals // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2022. — Vol. 172. — Art. 108998.
29. Liu H., Wang Z., Feng Y. Reliability analysis of submersible pumps in municipal water supply systems // *Reliability Engineering and System Safety*. — 2021. — Vol. 210. — Art. 107528.
30. Patel R., Singh S., Verma N. Performance characteristics of high-head submersible pumps for irrigation applications // *Agricultural Water Management*. — 2020. — Vol. 234. — Art. 106146.
31. Adewumi O., Ogunleye T., Alabi O. Field performance monitoring of electrical submersible pumps using IoT-based sensors // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22, No. 9. — Art. 3457.
32. Zhang Y., He X., Luo T. Wear mechanisms of submersible pump impellers under sand-laden flow // *Wear*. — 2021. — Vol. 476. — Art. 203709.
33. Smith J., Taylor R., Johnson M. Surging phenomena in electrical submersible pumps: experimental investigation // *Journal of Fluids Engineering*. — 2020. — Vol. 142, No. 12. — Art. 121204.
34. Al-Mutairi S., Al-Hadrami H., Ahmed K. Electrical submersible pump failures in Middle East fields: root causes and mitigation // *SPE Production & Operations*. — 2019. — Vol. 34, No. 2. — P. 233–242.
35. Rahman M., Chowdhury A., Alam S. Modeling of ESP systems using artificial neural networks for production optimization // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 196. — Art. 107677.
36. Luo W., Chen H., Yang S. Effect of gas-liquid ratio on ESP head performance // *Chemical Engineering Science*. — 2022. — Vol. 247. — Art. 117050.

37. Adeboye A., Ajayi E., Akinlabi S. Advances in submersible pump design for geothermal applications // *Renewable Energy*. — 2021. — Vol. 170. — P. 1032–1044.
38. Khalid M., Hassan N., Rehman S. Computational analysis of submersible pump cooling under varying operating conditions // *Thermal Science and Engineering Progress*. — 2020. — Vol. 19. — Art. 100590.
39. Abdulkareem A., Musa A., Idris U. Maintenance strategies for extending lifespan of submersible pumps in water supply systems // *Water Resources Management*. — 2023. — Vol. 37. — P. 2225–2240.
40. Li J., Zhao Y., Xu D. Intelligent diagnosis of ESP performance using hybrid deep learning models // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. — 2022. — Vol. 115. — Art. 105224.
41. Bello A., Mohammed S., Adebayo O. Experimental evaluation of vibration damping methods in ESP systems // *Journal of Sound and Vibration*. — 2021. — Vol. 502. — Art. 116108.
42. Kumar P., Rajan R., Mehta V. Investigation of cavitation erosion in ESP impellers using high-speed imaging // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2020. — Vol. 114. — Art. 110074.
43. Singh A., Sharma D., Chauhan V. Sustainable use of submersible pumps in groundwater irrigation in South Asia // *Sustainability*. — 2022. — Vol. 14, No. 7. — Art. 3921.
44. Adeyemi B., Adesina K., Omole F. Life-cycle cost analysis of submersible pump installations in municipal projects // *Journal of Infrastructure Systems*. — 2021. — Vol. 27, No. 3. — Art. 04021033.
45. Johnson R., Baker T., Evans P. ESP reliability enhancement through advanced materials and coatings // *Materials Today: Proceedings*. — 2023. — Vol. 72. — P. 1124–1132.
46. Patel K., George D., Fernandes L. Performance optimization of submersible pumps for desalination systems // *Desalination*. — 2020. — Vol. 491. — Art. 114584.