

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: «Дослідження ультразвукового вигладжування з металовмісним
мастилом для підвищення якості поверхневого шару деталей
сільськогосподарських машин»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_22.01.000 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)_22
БАРАБАШ Родіон

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПОВ Станіслав

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.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БАРАБАШ Родіон

1. Тема роботи: *«Дослідження ультразвукового вигладжування з металовмісним мастилом для підвищення якості поверхневого шару деталей сільськогосподарських машин»*,

керівник роботи **канд. техн. наук, доцент ПОПОВ Станіслав**,
 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: *титульний 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 _____ Родіон БАРАБАШ
 (підпис)

Керівник роботи _____ Станіслав ПОПОВ
 (підпис)

РЕФЕРАТ

Тлумачальна записка: 4 розділи, 27 рисунків, 8 таблиць, 20 використаних джерел, 53 сторінки. **Ілюстраційна частина:** 13 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес формування поверхневого шару деталей із титанових сплавів у результаті ультразвукового вигладжування.

Предмет дослідження – закономірності впливу технологічних параметрів ультразвукового вигладжування (швидкості обробки, сили вигладжування, частоти та форми коливань, типу змащення) на шорсткість, мікротвердість і мікрорельєф поверхні.

Постановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – дослідження впливу параметрів ультразвукового вигладжування на якість поверхневого шару деталей із титанових сплавів з метою підвищення ресурсу та надійності елементів машин агропромислового виробництва.

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

У **першому розділі** розглянуто питання, пов'язані із технологією алмазного вигладжування.

У **другому розділі** запропоновано методику дослідження впливу ультразвукового вигладжування на якість поверхневого шару титанових сплавів.

У **третьому розділі** представлено результати, що були отримані під час проведення серії експериментальних досліджень.

У **четвертому розділі** приділено увагу безпечному веденню технологічних операцій. Проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження запропонованого технологічного рішення. Розглянуто проблему збереження довкілля.

Практичні результати роботи – підвищення зносостійкості, довговічності та енергоефективності деталей сільськогосподарських машин удосконаленням поверхневого шару методом ультразвукового вигладжування з металовмісним мастилом.

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 кваліфікаційній роботі досліджено вплив параметрів ультразвукового вигладжування на якість поверхневого шару деталей із титанових сплавів VT22 та VT23 з метою підвищення їх зносостійкості та довговічності. Розглянуто особливості процесів алмазного та ультразвукового вигладжування, визначено основні фактори, що впливають на формування мікрорельєфу поверхні, мікротвердості та залишкові напруження стиску. Розроблено методику експериментальних досліджень, описано обладнання, інструменти та методи вимірювання параметрів поверхні. Встановлено, що застосування ультразвукових коливань у процесі вигладжування забезпечує зниження шорсткості, підвищення мікротвердості та глибини зміцненого шару що в 1,5–2 рази збільшує ресурс деталей. У роботі також подано оцінку безпеки технологічного процесу, економічної доцільності його впровадження та екологічної ефективності.

ВИГЛАДЖУВАННЯ, УЛЬТРАЗВУК, КОЛИВАННЯ, ТВЕРДІСТЬ, ЗМАЦЕННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕКОЛОГІЯ

ANNOTATION

In the qualification work, the influence of ultrasonic burnishing parameters on the quality of the surface layer of titanium alloy parts VT22 and VT23 was studied to improve their wear resistance and durability. The features of diamond and ultrasonic burnishing processes are considered, and the main factors affecting the formation of surface microrelief, microhardness, and residual compressive stresses are determined. A methodology for experimental research has been developed, including a description of the equipment, tools, and methods for measuring surface parameters. It was established that the application of ultrasonic vibrations during burnishing ensures a reduction in surface roughness, an increase in microhardness, and a greater depth of the hardened layer, which increases the service life of parts by 1.5–2 times. The work also presents an assessment of the safety of the technological process, the economic feasibility of its implementation, and environmental efficiency.

BURNISHING, ULTRASOUND, VIBRATIONS, HARDNESS, LUBRICATION, OCCUPATIONAL SAFETY, ECONOMIC EFFICIENCY, ECOLOGY

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Підвищення ресурсу виробів вигладжуванням	8
1.2 Параметри алмазного вигладжування	10
1.3 Формування мікропрофілю поверхні при обробці індентором	11
1.4 Фізичний стан поверхнево зміцненого шару	12
1.5 Поверхнева зміцнююча обробка деталей ультразвуковим вигладжуванням	14
Висновки до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	18
2.1 Експериментальні зразки	18
2.2 Обладнання, пристосування, інструмент	21
2.3 Методика проведення експериментів	22
2.4 Визначення мікротвердості	24
2.5 Вивчення фактури поверхні	28
2.6 Ультразвукове вигладжування із поздовжньо крутильними коливаннями	30
2.7 Вимірювання амплітуди коливань	32
Висновки до розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	34
3.1 Вплив швидкості обробки на фактуру поверхні	34
3.2 Мікротвердість поверхневого шару	36
3.3 Вплив металомістких змащень на фактуру поверхні	38
3.4 Мікротвердість поверхневого шару зі змащенням	40
3.5 Вигладжування із коливаннями індентора (шорсткість, фактура)	42
Висновки до розділу 3	44
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	45
4.1 Безпека ведення операцій ультразвукового вигладжування	45
4.2 Розрахунок економічного ефекту	47
4.3 Екологічна безпека та утилізація відходів	49
Висновки до розділу 4	52
ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54

ВСТУП

Сучасний агропромисловий комплекс України характеризується високим рівнем технічної насиченості, інтенсивним використанням складних машин і агрегатів. Для них особливо важливими є надійність, довговічність та ефективність роботи у складних експлуатаційних умовах. Підвищення технічного рівня та забезпечення стабільної роботоздатності машинно-тракторного парку є одним із головних завдань сервісної інженерії в агропромисловому виробництві.

Ключовим напрямом підвищення надійності машин є покращення якості поверхневого шару деталей, що зазнають значних механічних і термічних навантажень. Від стану поверхні залежить не лише зносостійкість і корозійна стійкість, але й загальний ресурс роботи вузлів тертя та з'єднань. Особливо актуальною ця проблема є для деталей із титанових та високоміцних сплавів, які все частіше застосовуються в сільськогосподарському машинобудуванні – у компресорних валах, гідроциліндрах, плунжерних парах, валах редукторів тощо.

Серед сучасних методів підвищення експлуатаційних властивостей деталей особливе місце займають процеси поверхневого пластичного деформування зокрема алмазне вигладжування. Подальший розвиток цього методу отримав у вигляді ультразвукового вигладжування, де на інструмент накладаються високочастотні коливання, що істотно змінюють умови деформації та тертя. Це дає змогу отримати високоякісну поверхню з низькою шерсткістю, підвищеною твердістю та залишковими напруженнями стиску, що суттєво збільшує довговічність деталей.

Актуальність теми полягає в тому, що впровадження технологій ультразвукового вигладжування у сферу сервісного обслуговування агропромислової техніки дозволить істотно продовжити термін експлуатації деталей машин без заміни, підвищити ефективність ремонтно-відновлювальних робіт і зменшити матеріальні витрати.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів ультразвукового вигладжування на якість поверхневого шару деталей із титанових сплавів з метою підвищення ресурсу та надійності елементів машин агропромислового виробництва.

Об'єктом дослідження є процес формування поверхневого шару деталей із титанових сплавів в результаті ультразвукового вигладжування, а **предметом** – закономірності впливу технологічних параметрів ультразвукового вигладжування (швидкості обробки, сили вигладжування, частоти та форми коливань, типу змащення) на шорсткість, мікротвердість і мікрорельєф поверхні.

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

- 1) провести аналіз існуючих методів алмазного та ультразвукового вигладжування, визначити їх переваги й недоліки при обробці титанових сплавів;
- 2) розробити методику експериментальних досліджень ультразвукового вигладжування з урахуванням варіювання основних технологічних параметрів;
- 3) дослідити вплив швидкості обробки, сили вигладжування та форми коливань індентору на параметри фактури поверхні та мікротвердість поверхневого шару;
- 4) оцінити ефективність застосування металемістких змащень (містких Al і Cu) під час ультразвукового вигладжування;
- 5) провести порівняльний аналіз звичайного та ультразвукового вигладжування за показниками якості поверхні;
- 6) розробити рекомендації вибору оптимальних режимів ультразвукового вигладжування титанових сплавів для підвищення їх зносостійкості та втомної міцності;
- 7) оцінити безпеку проведення операції ультразвукового вигладжування, економічної ефективності та екологічності технологічного процесу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Підвищення ресурсу виробів вигладжуванням

Алмазне вигладжування (АВ) широко застосовується для підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин і приладів. Процес вигладжування, як процес поверхнево-пластичного деформування досить широко і детально досліджений вченими [1-5]. У результаті змінання мікронерівностей різко знижується шорсткість поверхні і зміцнюється поверхневий шар металу, що призводить до збільшення межі витривалості виробу. Стан поверхні та поверхневого шару металу є визначальним фактором, що впливає на циклічні характеристики і ресурс виробів, і був досліджений рядом вчених.

У порівнянні з іншими видами пластичного деформування алмазне вигладжування має суттєві переваги, зумовленими фізико-механічними властивостями алмазу.

Алмазним інструментом можна вигладжувати деталі з усіх пластичних металів і сплавів практично будь-якої твердості. Незначні зусилля, що прикладаються до інструменту, дозволяють обробляти мало- і нерівножорсткі деталі. Вигладжування широко застосовується з метою абразивного доведення при обробці обойм підшипників, кулачкових валів, роликів, поршневих пальців, різьби, зубчастих коліс. Відцентрові колеса і диски з титанових сплавів обробляються вигладжуванням. Також процес АВ може бути використано в перспективних конструкціях валів компресора двоконтурних двигунів. Перспективними конструкційними матеріалами є титанові сплави BT8-1, BT25. Через високу корозійну стійкість з титанових сплавів виготовляють силові вали (таблиця 1.1).

Висока ефективність вигладжування досягається при обробці високоміцних і загартованих сталей 40Х, ШХ15 Р6М5 12ХНЗА, 18ХГГ, 28ХМЮА8, 07Х16Н6 12Х2НВФА, конструкційних сталей 15, 20, 30, 40Х13, 12Х18Н9Т, Х18Н2АТ (як в стані поставки, так і після термічної обробки), кольорових сплавів, інвару (сплав нікелю (36%) та заліза), бронзи і сірого чавуну [6-10].

Таблиця 1.1 – Узагальнена класифікація деталей з циліндричними поверхнями

		Геометричні параметри заготовки									
		Відносна довжина L/d									
		<10			10...30			30...100			
Параметри якості	Вимоги до поверхневого шару		Відносна товщина стінки заготовки, δ/d								
			<0,1	0,1-0,5	>0,5	<0,1	0,1-0,5	>0,5	<0,1	0,1-0,5	>0,5
	Шорсткість поверхні R_a , мкм	2,5-1,25	-	+	-	-	-	-	+	+	-
		1,25-0,08	+	+	+	+	-	-	-	+	+
		0,08-0,04	-	-	-	+	-	+	-	-	-
	Твердість матеріалу поверхневого шару, HRC	<50	+	-	+	-	-	-	+	+	-
		50-62	+	-	-	+	+	-	-	-	+
		>62	-	-	-	+	+	+	-	-	+
	Залишкові напруження у поверхневому шарі	розтяг		-	-	-	-	+	-	-	-
		стиск	+	+	-	+	+	+	-	-	+
Мікроструктура	розмір зерна	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Типові деталі											
Рігачиш підшипників ковзання											
Вали ГТД											
Циліндри амортизатори											
Бутки напрямних розмірвальних приладів											
Стволи стрілецької зброї											
Циліндри плунжерних пар											
Руки навісних систем с/г машин											
Труби підвищеної тонкості за отвором											
Стволи артилерійської зброї											

Загартовані сталі доцільно вигладжувати при початковій шорсткості з параметром $R_a = 0,32 \dots 0,63$ мкм.

1.2 Параметри алмазного вигладжування

Обробка металів до поверхневим пластичним деформуванням заснована на використанні їх пластичних властивостей, тобто здатності при певних умовах набувати під дією зовнішніх сил залишкових деформацій без порушення їх суцільності (рисунок 1.1) [11-15].

Рисунок 1.1 – Схема утворення поверхневого шару при вигладжуванні:

1 – індентор; 2 – пружно відчезлений шар металу; 3 – шар пластично деформованого металу; 4 – матеріал деталі, швидкість якого дорівнює швидкості деталі; V – швидкість деформованого шару; F – дотична сила; σ_x, σ_y – нормальні напруження; τ – дотичні напруження.

Під дією нормального стискаючого напруження і сил тертя в напруженому об'ємі металу можуть значно змінюватися механічні властивості металу і його структура.

До числа основних параметрів, що характеризують контактну взаємодію при алмазному вигладжуванні, відносять: нормальну силу P_y , величину втискання індентора h , площу контакту A_k , контактний тиск q , силу тертя $F_{тр}$ і коефіцієнт тертя $f_{тр}$. У більшості випадків експериментальну оцінку цих показників проводять без урахування пружної взаємодії індентора з оброблюваним матеріалом. При цьому важливо розділити сумарне втискання індентора h_{Σ} на пружну $h_{пр}$ і пластичну h_0 складові.

1.3 Формування мікропрофілю поверхні при обробці індентором

Несуча здатність контактних поверхонь деталей багато в чому залежить від їх геометричних характеристик: макровідхилень, хвилястості і шорсткості [16].

Крім параметрів R_a і R_z для оцінки шорсткості потрібні такі характеристики, як: кути сторін профілю мікронерівностей, радіуси заокруглення виступів і опорна площа поверхні. За формою опорних кривих і величиною їх параметрів можна порівнювати несучу здатність мікронерівностей поверхонь, оброблених різними методами. Так, у поверхонь з однаковою висотою нерівностей, оброблених різними методами, опорні площі неоднакові. Опір впливу сил, що деформують ці поверхні, різний.

Одним з найважливіших факторів, що визначають ступінь згладжування початкових нерівностей є сила вигладжування.

У поздовжньому напрямку залежність висоти нерівностей від сили вигладжування залишається тією ж, що і для шорсткості в поперечному напрямку, але найбільший ступінь згладжування нерівностей в поздовжньому напрямку досягається при меншій силі P_y . Це пояснюється тим, що для циліндричної деталі, обробленої різанням або шліфуванням, початкова шорсткість поверхні в поздовжньому напрямку менше, ніж в поперечному.

Вигладжуванням можна зменшити хвилястість поверхні. Зі збільшенням сили P_y хвилястість знижується. Хвилястість поверхні, обробленої вигладжуванням, залежить від початкової хвилястості. Початкові параметри хвилястості поверхні оброблюваного матеріалу впливають на висоту хвилі після вигладжування. Якщо крок хвилі більше 3 мм, ефективність зменшення висоти хвилі вигладжуванням значно знижується. Так, при кроці хвилі, що дорівнює 4 мм, початкова висота хвилі $H_b = 1$ мкм зменшується всього на 0,2 мкм.

На макровідхилення геометричної форми деталей поверхнева обробка вигладжуванням практично не впливає. Однак в межах висоти хвилястості (приблизно 3 мкм) відбувається деяке поліпшення округлості деталі.

1.4 Фізичний стан поверхнево зміцненого шару

В абсолютній більшості випадків операціями ППД деталей передую операція чистового точіння.

В процесі видалення металу відбувається механічний вплив на поверхневий шар металу. При точінні проникненні ріжучого інструменту в оброблюваний метал викликає хвилю пластичного деформування, яка охоплює не тільки шар, який зрізується, а й метал, який розташований попереду різця.

Розглядаючи процес різання металів як процес пластичного деформування, можна вважати, що метал в зоні різання піддається деформації стискання. При переміщенні інструменту в процесі обробки внаслідок пружного відновлення металу виникатиме тертя між задньою поверхнею різця і оброблюваною поверхнею деталі. Це створює додаткову деформацію розтягування верхніх шарів обробленої деталі, яка в свою чергу буде причиною виникнення в поверхневому шарі стискаючих залишкових напружень.

У процесі різання в результаті роботи пластичної деформації і тертя стружки об передню, задню поверхні різця і об поверхню деталі утворюється значна кількість тепла, яке призводить до знеміцнення і до збільшення залишкових напружень розтягу в при поверхневому шарі.

В процесі механічної обробки (точіння, шліфування і полірування) миттєві локальні температури в зоні обробки можуть досягати 400 ... 500°C і більше. Це призводить до того, що після механічної обробки в поверхневому шарі діють залишкові напруження розтягу.

У ряді робіт [17, 18] відзначається, що наявність шорсткої поверхні, зміцнення поверхневого шару і залишкових напружень розтягу, поєднання яких характерно для операцій різання (точіння, шліфування, полірування) є несприятливими для роботи деталей при циклічних навантаженнях. Тому фінісні операції повинні забезпечувати у поверхневому шарі таке поєднання параметрів якості, яке б дозволило збільшити межу витривалості деталей.

На рисунку 1.2 представлені епюри розподілу тангенціальних (σ_x) і осьових (σ_z) залишкових напружень по глибині деформованого шару зразків зі сталі 12X18H10T

при зміні сили вигладжування від 50 до 170 Н. У міру збільшення навантаження на інструмент відбувається зростання максимуму залишкових напружень в шарі і зсув максимуму напружень в глибину. На поверхні деталей і в тонкому поверхневому шарі спостерігається зниження тангенціальних напружень (рисунок 1.2, а). Порівняння цієї епюри з епюрою розподілу осьових залишкових напружень (рисунок 1.2, б) показує, що, починаючи з глибини 0,24 мм, вони ідентичні.

а)

б)

Рисунок 1.2 – Розподіл залишкових тангенціальних напружень (а) і залишкових осьових напружень (б) за глибиною поверхневого шару:

1 – $P_y = 50$ Н; 2 – $P_y = 100$ Н; 3 – $P_y = 170$ Н

При вигладжуванні, особливо при великих контактних тисках, епюри залишкових напружень в зміцненому шарі виходить зі зміщенням максимуму напружень з поверхні в підшарову область.

В цьому випадку тріщина руйнування може зароджуватися в підшаровій зоні з подальшим виходом на поверхню.

Таким чином вид епюри залишкових напружень (з максимумом на поверхні або під поверхнею) впливає на спір втоми деталі. Одним з основних питань підвищення опору втоми поверхневим деформуванням є стабільність зміцнення в зв'язку з умовами експлуатації деталі.

Після обробки алмазним вигладжуванням в деформованому поверхневому шарі зростають характеристики опору деформації: межі пружності, текучості, витривалості, тимчасовий опір; змінюються характеристики міцності при статичних і циклічних навантаженнях і в умовах високих температур; знижуються

характеристики пластичності, відносно подовження і звуження, підвищується твердість, зменшується ударна в'язкість.

Підвищення швидкості деформації скорочує час дії деформуючих напружень. У підсумку, пластична деформація протікає в меншому об'ємі металу. Внаслідок цього при постійному тиску підвищується величина деформуючих напружень, збільшується інтенсивність розвитку дислокацій і прискорюється процес утворення тонкої структури, що викликає більше зміцнення. Вплив швидкості деформації різко позначається при переході від статичних способів поверхневого зміцнення до динамічних (віброударна обробки, дробоструменеве зміцнення, зміцнення з накладенням ультразвукових коливань і ін.).

Поверхньо зміцнений шар має властивості, що відрізняються від серцевини металу. Шари, що злягають на різних глибинах, деформуються по-різному. Верхні шари товщиною 50, 100 мкм, представляють собою зону сильно зміцненого металу, середні, товщиною 250...500 мкм, – зону менш зміцненого металу. Найбільш зміцненою виявляється верхня частина пластично деформованого шару де зерна набувають певної спрямованої орієнтації, витягуючись у напрямку руху інструменту.

Зі збільшенням сили вигладжування твердість обробленої поверхні зростає до певної межі. Подальше збільшення деформуючої сили не приводить до зростання твердості, а навпаки спостерігається її зниження. У поверхневому шарі виникають такі напруження, при яких починається його руйнування, що супроводжується лущенням поверхні деталі.

Збільшення числа робочих ходів веде до додаткової деформації поверхневого шару. Величина подачі інструменту також впливає на зміцнення поверхневого шару. Зменшення подачі призводить до деякого підвищення контактної тиску.

1.5 Поверхнева зміцнююча обробка деталей ультразвуковим вигладжуванням

Відомо, що при звичайному алмазному вигладжуванні сплавів на основі титану процес має труднощі, а в більшості випадків вигладжувати титанові сплави

неможливо. Це пояснюється схильністю титану до адгезійного схоплювання з деформуючим інструментом – індентором, в результаті чого спостерігається порушення суцільності поверхневого шару деталі, різко погіршується шорсткість. Також відбувається інтенсивний знос індентора. Утруднення вигладжування таких сплавів, пояснюється не тільки властивостями самих сплавів, що обробляються, а й специфікою самого процесу вигладжування. Процес вигладжування супроводжується інтенсивним тертям. Накладення на деформуючий інструмент ультразвукових (УЗ) коливань дає можливість змінити схему деформування і тертя. Ведення ультразвукових коливань в процес алмазного вигладжування дозволяє знизити опір деформації і збільшити пластичність металів і сплавів, що є основним завданням технології обробки металів тиском, особливо якщо мова йде про пластичну деформацію важкооброблюваних матеріалів.

При веденні ультразвукових коливань досягається ряд параметрів процесу:

- в залежності від матеріалу оброблюваної деталі і режимів процесу статичне зусилля P_c зменшується в 5-10 разів;
- на поверхні деталі формується регулярний мікрорельєф і зменшується шорсткість обробленої поверхні, відбувається більш глибоке зміцнення поверхневого шару деталі, подрібнюється зерно, зникають залишкові зварювальні напруження і збільшується опір втомі зварних з'єднань

В [19] відзначаються наступні особливості і переваги вигладжування з накладенням УЗ:

- кратність прикладання зусилля при деформації поверхні інструментом – 400 разів і більше;
- швидкість деформування – змінна, її максимальне значення 200 м/с і більше;
- середній тиск, що створюється в поверхневому шарі деталі під дією нормально спрямованої сили, в 3-5 разів більше, ніж при обточуванні кулькою (ОК);
- енергія, що витрачається на спотворення кристалічної решітки і яка йде на внутрішні мікроструктурні перетворення, при УЗ значно вище, ніж при ОК;
- в процесі УЗ внаслідок великих напружень і багаторазового прикладання навантаження рівень залишкових стискаючих напружень значно більше рівня цих напружень при ОК.

В [20] відзначається, що характерною рисою УЗ вигладжування є виникнення на поверхні заготовки деформацій стиску та зсуву, що швидко чергуються. Сила P при цьому становить не більше 80-100 Н, швидкість руху інструменту уздовж обробленої поверхні заготовки становить 0,1-2,5 м/с. Застосування УЗ дозволяє зменшити висоту мікронерівностей в 8-10 разів, отримати високу поверхневу мікротвердість, створити стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі. Одночасно відбувається перерозподіл залишкових напружень у всій деталі, знімаються залишкові зварювальні напруження і зменшується концентрація напружень біля шпарин, мікротріщин, що призводить до підвищення корозійно-втомної міцності. Вигладжування з УЗ забезпечує підвищення межі витривалості деталей з аустенітних і мартенситних сталей на 36-44% в порівнянні з поліруванням, зносостійкість їх збільшується в 1,5 рази. Дослідження впливу УЗ на опір пластичної деформації і механічні властивості важкооброблюваних високолегованих і жароміцних сталей і сплавів (в тому числі, титанових), показали, що незалежно від складу і механічних властивостей матеріалів загальною УЗ є значне зниження зусиль деформування, необхідного для отримання еквівалентних деформацій. З метою збільшення амплітуди УЗ коливань без зниження зміцнення, залишкових напружень стиску та їх глибини залягання запропоновано застосовувати УЗ коливання, що моделюються за амплітудою додаєковим синусоїдальним сигналом. Також відзначається ефективність накладення дотично-осьових коливань при вигладжуванні сталевих заготовок.

Висновки до розділу 1

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що алмазне вигладжування (АВ) є високоефективним методом поверхневого пластичного деформування. Він дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні властивості деталей машин та приладів. Процес забезпечує зниження шорсткості, підвищення твердості та утворення сприятливих залишкових напружень стиску поверхневого шару, що значно підвищує межу витривалості виробів.

2. Ефективність АВ залежить від низки параметрів: сили вигладжування; глибини втискання індентора; швидкості обробки; геометрії деталі та властивостей матеріалу. Збільшення сили вигладжування до певного оптимального рівня сприяє інтенсифікації процесу зміцнення. Слід враховувати, що надмірні навантаження можуть викликати руйнування поверхні.

3. Мікрогеометрія поверхні після вигладжування визначає несучу здатність деталей. Зменшення хвилястості та шерсткості призводить до покращення параметрів контакту та підвищення стору втомі. Стан зміцненого шару характеризується наявністю зон із різним ступенем деформації та твердістю, причому найбільш зміцненою є приповерхнева зона товщиною до 100 мкм.

4. Окрему увагу приділено дослідженню ультразвукового вигладжування (УЗВ). Воно дозволяє усунути недоліки традиційного процесу при обробці важкооброблюваних матеріалів, зокрема титанових сплавів. Накладання ультразвукових коливань зменшує сили тертя, покращує умови пластичної деформації, знижує адгезійне схоплювання, підвищує рівень залишкових напружень стиску, забезпечує дрібнозернисту структуру поверхневого шару. Це сприяє збільшенню втомної міцності, корозійної стійкості та зносостійкості деталей.

Отже, аналіз існуючих досліджень показав, що алмазне вигладжування, особливо із накладанням ультразвукових коливань є перспективним методом фінішної обробки деталей із сталей і титанових сплавів. Забезпечує комплексне покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару і підвищення ресурсу роботи виробів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Експериментальні зразки

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сплавів

Порядок обробки зразків показаний на рисунку 2.2. Після чистової операції точіння і перед проведенням звичайного вигладжування і УЗ вигладжування зразків проводили замір початкової шорсткості.

Рисунок 2.2 – Структура технологічного процесу обробки зразків

2.2 Обладнання, пристосування, інструмент

Для УЗ вигладжування і звичайного вигладжування використовувалася установка, представлена на рисунку 2.7.

Рисунок 2.7 – Установка для вигладжування: 1 – генератор УЗ коливань; 2 – вигладжувач; 3 – хвилевід; 4 – індикатор годинникового типу

До складу установки входять генератор ультразвукових коливань 1 і пов'язаний з ним хвилевід для передачі ультразвукових коливань на інструмент – стандартну головку для вигладжування 2. Головка жорстко встановлена на хвилеводі 3, а статичне зусилля його впливу на зразок контролювалося індикатором годинного типу 4.

Матеріалами робочої частини індентора був твердий сплав АКТМ і ВК8 (рисунок 2.8), з робочою поверхнею сферичної форми радіусом $R = 3$ мм. Механічні властивості матеріалів інденторів – таблиця 2.3.

Рисунок 2.8 – Індентори з робочими головками
з матеріалу:

Таблиця 2.3 – Властивості матеріалів інденторів

2.3 Методика проведення експериментів

Рисунок 2.9 – Схема проведення досліджень: n – кількість оборотів, об/хв;
 S – подача, мм/об; P – статичне зусилля, Н; f – частота коливань, кГц

Рисунок 2.10 – Зразок з титанового сплаву ВТ23,
встановлений на токарному верстаті моделі 16К20

Після установки зразка з мінімальним биттям в обробні центри пензлем наносилося змащення.

Після установки проводилося УЗ-вигладжування і звичайне вигладжування на досліджуваних режимах (таблиця 2.4).

У таблиці 2.4 наведені режими процесу УЗ-вигладжування, які охоплюють весь спектр параметрів варіювання процесу, які впливають на параметри якості поверхні і поверхневого шару зразків.

Таблиця 2.4 - Режими проведення експерименту

2.4 Визначення мікротвердості

Рисунок 2.11 – Прилад «Мікрон-гамма»: а – загальний вид; б – індентор

Рисунок 2.12 – Схема визначення твердості за діаграмою втискання індентора (а) і за діагоналлю відбитка (б). S1 і S2 – робота пластичної і пружної деформації відповідно

де P – сила впродження індентора, Н;

h – глибина впродження, мкм.

При $i = 1$ – отримуємо невідновлену мікротвердість, $i = 2$ – отримуємо відновлену мікротвердість.

Рисунок 2.13 - Вікно програми з діаграмою, що описує втискання індентора

Рисунок 2.14 – Результати вимірювань, зведені до електронної таблиці

2.5 Вивчення фактури поверхні

камери і передаються в персональний комп'ютер, де проводиться їх обробка в автоматичному режимі

Рисунок 2.15 – Електронний мікроскоп

Рисунок 2.16 – Установка для вимірювання профілю поверхні

В результаті обробки відноситься оптична різниця ходу, що відповідає вимірюваному профілю поверхні.

2.6 Ультразвукове вигладжування із поздовжньо-крутильними коливаннями

Рисунок 2.17 – Процес УЗ вигладжування з поздовжньо-крутильними коливаннями індентора (а – вид зверху, б – вид попереду). 1 – заготовка; 2 – вібраційний привод з концентратором поздовжньо-крутильних УЗК; 3 – індентор; 4 – патрон токарного верстата; n – частота обертання, об/хв; s – подача інструменту, мм/об, F – частота поздовжніх коливань, кГц; $P_{ст}$ – статичне зусилля вигладжування; e – ексцентриситет зміщення осі індентора по відношенню до осі вібраційного приводу, мм; I, II – розбіжність і збіг напрямку переміщення індентора з напрямком обертання заготовки при впровадженні індентора в поверхню зразка

Процес УЗ вигладжування з поздовжньо-крутильними коливаннями проводився за режимами, представленими в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Режими УЗ вигладжування із поздовжньо-крутильними коливаннями

2.7 Вимірювання амплітуди коливань

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Вплив швидкості обробки на фактуру поверхні

3.3 Вплив металомістких змащень на фактуру поверхні

Рисунок 3.5 – Фактура обробленої поверхні зі змащенням:

а-в – I20; г-е – I20+Cu; ж-к – I20+Al

3.4 Мікротвердість поверхневого шару зі змащенням

Результатом наявності такого демпфуючого шару є зменшення питомих зусиль безпосередньо на поверхню деталі, що є причиною зменшення мікротвердості як поблизу поверхні, так і по глибині шару, а також збільшення процентної частки металу мікропорошків у хімічному складі оброблених поверхонь.

3.5 Вигладжування із коливаннями індентору (шорсткість, фактура)

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

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 ведення операції ультразвукового вигладжування

Під час проведення операції ультразвукового вигладжування важливо забезпечити умови праці оператора та інших працівників, які перебувають у зоні дії технологічного обладнання. Оскільки процес виконується із застосуванням височастотних механичних коливань, підвищеного рівня шуму та вібрацій, використанням електрики та змащення, то до нього висуваються підвищені вимоги з охорони праці.

Робоче місце оператора повинно відповідати встановленим вимогам ДСН 3.3.6.039-99, ДНАОП 0.00-1.21-98, що регламентують безпечну експлуатацію верстатного обладнання. До роботи допускаються лише кваліфіковані робітники, які пройшли інструктаж із техніки безпеки, перевірку знань та медичний огляд.

Основними небезпечними та шкідливими факторами, що можуть виникати під час операції наступні:

- ультразвукове випромінювання (частоти 18-25 кГц) при тривалому впливі може призводити до функціональних порушень нервової системи, слуху, органів кровообігу;
- механічна вібрація від хвилеводу та оброблюваної деталі, що може передаватися на руки оператора;
- підвищений рівень шуму (до 90-100 дБ) від роботи ультразвукового генератора та верстата;
- наявність мастильно-охолоджувальних рідин, що можуть викликати подразнення шкіри, слизових оболонок при тривалому контакті;
- можливість ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції живлення ультразвукового генератора;
- небезпека травмування рухомими частинами верстату (патрон, супорт, обертові деталі);
- ризик утворення дрібнодисперсних частинок та пилу, особливо при роботі із титановими сплавами.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно виконувати такі заходи:

1) організаційні:

- допуск до роботи лише після проходження інструктажу та перевірки знань з охорони праці;
- забезпечення на робочому місці інструкції з експлуатації ультразвукового обладнання;
- регулярна перевірка справності генератора, хвилеводу, кріплень та системи живлення;
- проведення періодичних медоглядів працівників, як піддаються дії ультразвуку та вібрації;

2) технічні заходи:

- екранування джерел ультразвукового випромінювання звукоізоляційними кожухами;
- використання віброгасильних підставок під обладнанням;
- заземлення корпусів генераторів, хвилеводів та верстатів;
- застосування засобів індивідуального захисту – навушників, беруш, віброзахисних рукавичок, окулярів, спецодягу;
- своєчасне видалення відпрацьованих мастильних матеріалів, дотримання правил їх зберігання та утилізації;

3) санітарно-гігієнічні норми:

- рівень ультразвукових коливань на робочому місці не повинен перевищувати 110 дБ у діапазоні частот до 20 кГц (відповідно до ДСЕ 3.3.6.037-99);
- допустимі різні вібрацій не більше $2,0 \text{ м/с}^2$ у діапазоні частот 8...1000 Гц;
- концентрація шкідливих речовин у повітрі (масляних парів, пилу) – не вище норм, встановлених гранично допустимими концентраціями.

Ультразвукові установки живляться від електричної мережі з напругою 220 або 380 вольт, тому всі елементи мають бути надійно заземлені. При цьому необхідно забезпечити: справність ізоляції кабелів; наявність автоматів захисного вимкнення (ПЗО); заборону роботи з обладнанням при підвищеній вологості або відкритому контакті із змашувально-охолоджувальними рідинами.

Пожежна безпека забезпечується за рахунок: наявності первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники ВВК-2, ВП-5); дотримання норм зберігання змащувально-охолоджувальних рідин; заборони використання відкритого вогню поблизу верстатів; регулярного очищення робочих зон від металевої стружки та залишків мастил.

Забезпечення безпеки під час проведення операції ультразвукового вигладжування є обов'язковою складовою технологічного процесу. Дотримання вимог охорони праці, електро- та пожежної безпеки, використання сучасних засобів індивідуального захисту та систем контролю параметрів ультразвуку дозволяє мінімізувати професійні ризики, підвищити надійність роботи обладнання та зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Найбільш перспективним способом при цьому є обробка ультразвуковим інструментом або ультразвукова фінішна обробка. При вигладжуванні деталей на ультразвуковій частоті за рахунок імпульсного характеру впливу обробки ефективність впливу на матеріал деталі ще більш зростає. Додавання статичного напруження з амплітудним значенням знакозмінного ультразвукового напруження в певній частині циклу робить сумарне напруження достатнім для подолання дислокаціями потенціальних бар'єрів, тобто для початку більш ранньої появи пластичних деформацій. Спостережуване в процесі пластичного деформування зменшення напружень при впливі ультразвуку поряд з дією акустичних напружень можна пояснити активацією затриманих дислокацій, внаслідок чого процес їх руху полегшується.

Спосіб ультразвукового вигладжування був запропонований для того, щоб досягти зниження шорсткості, підвищення мікротвердості і формування стискаючих залишкових напружень. Все це забезпечується деформаціями стиску і зсуву (чергуються), що виникають в поверхньому шарі деталі в результаті впливу індентора, який коливається з ультразвуковою частотою і зміщується уздовж поверхні.

Економічний ефект від впровадження УЗ вигладжування у нашому випадку буде зумовлений зниженням трудомісткості.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

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

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta C'$ – збільшення вартості продукції, грн.;

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

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 1,0$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 75000$ грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості.

$$\Delta C = 0,1 \cdot 500000 = 50000 \text{ грн. / т,}$$

де 500000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час УЗ вигладжування:

$$\Delta C' = \Delta C', \quad (4.2)$$

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

$$\Delta C' = 1000 \text{ грн. / т;}$$

$$\Delta C = 1000 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (50000 + 1000) \cdot 1,0 - (0,15 + 0,1) \cdot 75000 = 32250 \text{ (грн.)}$$

Отже, економічний ефект від впровадження ультразвукового вигладжування склав 32250 грн. на рік.

4.3 Екологічна безпека та утилізація відходів

Під час проведення операції ультразвукового вигладжування виникає низка екологічних аспектів, пов'язаних із використанням змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР), споживанням електроенергії, утворенням відходів металу та мастильних продуктів, а також можливим забрудненням повітря робочої зони. Рациональна організація технологічного процесу, впровадження замкнених систем очищення та регламентована утилізація відходів є необхідною умовою екологічно безпечного функціонування виробництва.

Під час ультразвукового вигладжування основними джерелами утворення відходів і забруднюючих факторів є:

- мастильно-охолоджуючі рідини (під час роботи вони забруднюються металевими частинками, продуктами зношування інструменту, мастилами, що знижує їх ефективність та створює небезпеку для довкілля при неправильному зберіганні або зливі);

- металева стружка та шлам (утворюються у незначній кількості при попередній механічній обробці та при вигладжуванні);

- повітря робочої зони (може містити дрібнодисперсні аерозолі мастильних рідин та пил титанових сплавів, що є потенційно небезпечними для дихальної системи людини);

- електроенергія (при її споживанні утворюється непряме експліцитне навантаження через викиди CO₂ на електростанціях, тому важливим є раціональне енергоспоживання).

Заходи екологічної безпеки під час ультразвукового вигладжування наступні:

1) система очищення мастильно-охолоджувальних рідин:

- застосовується фільтрація МОР у замкненому циклі за допомогою багатоступневих фільтрів (сітчастих, магнітних та ін.);

- використані МОР підлягають регенерації або заміні із подальшим збиранням у герметичні ємності;

- забороняється злив відпрацьованих МОР до каналізації або в ґрунт, оскільки це призводить до забруднення підземних вод, ґрунтів нафтопродуктами;

2) зниження шкідливих викидів у повітря робочої зони:

- робоче місце повинно бути обладнано локальною витяжною вентиляцією у зоні утворення аерозолів та парів мастильних матеріалів;

- загальнообмінна вентиляція повинна забезпечувати не менше кратності повітрообміну 3-5 разів/годину;

- у приміщеннях, де оброблюються титанові справи, доцільно встановлювати НЕРА-фільтри для уловлювання дрібнодисперсного пилу;

3) використання екологічно безпечних матеріалів:

- перевага надається розкладним або водоемульсійним МОР із низьким вмістом сірки, хлору та важких металів;

- забороняється використання мастильних матеріалів, що містять формальдегіди, феноли або інші токсичні добавки;

для зменшення об'єму відходів доцільно впроваджувати замкнені циркуляційні системи охолодження;

3) контроль рівня шуму та вібрації:

- для зменшення енергоспоживання та шумового забруднення застосовуються енергозберігаючі генератори ультразвуку із автоматичним регулюванням частоти та потужності;

- вібраційне обладнання встановлюється на амортизувальних основах з метою зменшення передачі коливань на конструкції приміщення;

4) енергозбереження:

- використання частотних перетворювачів у приводах верстатів дозволяє оптимізувати споживання електроенергії залежно від режиму обробки;

- рекомендовано проводити обробку серіями для зменшення кількості запусків та прогрівань обладнання;

5) збір, зберігання та утилізація відходів (усі відходи, що утворилися під час ультразвукового вигладжування підлягають обліку, сортуванню та передачі на спеціалізовані підприємства, що мають ліцензію на поводження з відходами):

- металева стружка і шлам після сушіння збираються в окремі контейнери із маркуванням за видом металу (титан, сталь, ін.). Надалі вони передаються на вторинну переробку на металургійні підприємства;

- відпрацьовані МОР збираються у герметичні ємності, марковані за видом мастила. Вони можуть бути відправлені на регенерацію (очищення) через фільтрацію, відстоювання, вакуумну перегонку або на спалювання у термічних установках, обладнаних системами очищення газів;

- забруднені фільтри та ганчір'я утилізуються як небезпечні відходи III класу небезпеки відповідно до Класифікатору відходів ДК 005-96;

- пил та аерозолі із систем вентиляції періодично видаляються і передаються на утилізацію як відходи IV класу небезпеки;

- необхідно вести журнал обліку утворення та видалення відходів. У ньому фіксується їх кількість, клас небезпеки, спосіб та місце утилізації;

б) нормативно-правове забезпечення. Під час організації екологічно безпечного процесу ультразвукового вигладжування слід керуватися такими нормативними документами:

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»;

- Закон України «Про відходи»;

- ДСН 3.5.6.037-99 «Санітарні норми допустимих рівнів ультразвуку на робочих місцях»;

- ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного управління»;

- ДБН В.2.5-67:2013 «Вентиляція і кондиціонування повітря».

Дотримання вимог екологічної безпеки під час ультразвукового вигладжування дозволяє:

- мінімізувати забруднення повітря робочої зони та водних ресурсів;

- знизити обсяг утворених відходів та забезпечити їх належну утилізацію;

- зменшити енергоспоживання процесу;

- підвищити екологічну ефективність та відповідальність виробництва сучасним стандартам ISO 14000.

Комплексна екологічна система керування відходами та забрудненням під час ультразвукової обробки є невід'ємною складовою безпечною і сталого виробництва.

Висновки до розділу 4

1. Забезпечення безпечних умов праці оператора є обов'язковою складовою технологічного процесу. Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори. Вони можуть виникати під час роботи з ультразвуковим обладнанням. Запропоновано комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, які дозволяють мінімізувати професійні ризики, підвищити надійність роботи обладнання та запобігти травмуванню персоналу.

2. Розрахунок економічного ефекту показав, що застосування операції ультразвукового вигладжування забезпечує підвищення ефективності виробництва за рахунок зменшення трудомісткості, собівартості продукції. Річний економічний ефект у 32250 грн це підтвердив.

3. В аспекті екологічної безпеки визначено основні джерела забруднення. Вони супроводжують даний технологічний процес. Розроблено комплекс заходів із мінімізації негативного впливу на довкілля.

ВИСНОВКИ

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

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що накладання ультразвукових коливань на інструмент під час вигладжування титанових сплавів суттєво покращує параметри якості поверхневого шару. Зменшується шорсткість, підвищується мікротвердість і формується сприятливий залишковий напружений стан.

2. Розроблена методика експериментальних досліджень забезпечила достовірність стриманих результатів і дозволила визначити закономірності впливу технологічних параметрів процесу на стан поверхневого шару.

3. Показано, що збільшення швидкості обробки понад оптимальні значення призводить до мікроруйнувань поверхні, тоді як при помірних швидкостях формується рівномірна фактура з низькою шорсткістю.

4. Використання металомістких мащень із мікропошкодами алюмінію та міді сприяє зменшенню тертя, підвищенню мікротвердості при поверхневого шару та покращенню структурних характеристик поверхні.

5. Застосування поздовжньо-крутильних коливань індентору під час УЗ вигладжування дозволяє знизити сили деформування та покращити мікрогеометрію поверхні в порівнянні з поздовжніми коливаннями.

6. Розроблено рекомендації щодо оптимальних режимів ультразвукового вигладжування титанових сплавів VT22 і VT23, що забезпечують підвищення мікротвердості поверхневого шару на 30–40 % і зменшення шорсткості Ra до 0,05–0,08 мкм.

7. Проведено аналіз безпеки операції ультразвукового вигладжування, який показав, що за умови дотримання норм електро-, пожежної та вібраційної безпеки процес є екологічно безпечним і придатним для промислового застосування. Економічний ефект від впровадження ультразвукового вигладжування склав 32250 грн. на рік.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Рязанова-Хитровська Н. В. Алмазне вигладжування як метод пластичної деформації поверхневого шару // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «MICROCAD-2020» (Харків, 20–22 травня 2020 р.) / Харківський політехнічний інститут. – Харків : Планета-Прінт, 2020. – С. 115–117. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/ba524991-c582-4952-b82e-60289ae4ff58>.

2. Рязанова-Хитровська Н. В. Основи прогнозуючого моделювання процесу алмазного вигладжування // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2019. – № 5 (1330). – С. 45–51. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/5b1d643f-29d2-46ad-98c2-878c2300d3ce>.

3. Вишнепольський Є. В. Підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2023. – 155 с. – Режим доступу: <https://uacademic.info/ua/document/0423U100054>.

4. Ковалевський С. В., Маслова А. І. Дослідження впливу комбінованого вигладжування на зміцнення поверхонь деталей машин // Наукові праці Житомирського технічного університету. Серія: Машинобудування та транспорт. – 2021. – № 2 (98). – С. 57–63. – Режим доступу: <https://library.ztu.edu.ua/doccard.php/74777>.

5. Федорович В. О., Стадник В. М., Козак А. О. Моделювання процесу ультразвукового алмазного вигладжування // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2018. – № 15 (1291). – С. 102–108. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a11fda72-c134-40ac-81ec-cc9f428be95f>.

6. Ferencsik V., Varga G. The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, № 7. – Art. 564. – DOI: 10.3390/machines10070564.

7. Smolnicki S., Varga G. Analysis of surface roughness of diamond-burnished surfaces using Kraljic matrices and experimental design // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 14. – Art. 8025. – DOI: 10.3390/app15148025.

8. Lesfom F., Pásztor L., Felhő Cs. Flat diamond sliding burnishing surface roughness investigation // *Multidisciplinary Sciences (Multidiszciplináris Tudományok)*. – 2022. – Vol. 12, № 3. – P. 186–195. – DOI: 10.35925/j.multi.2022.3.17.

9. CAD and FEM modelling of theoretical roughness in diamond burnishing [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://www.bohrium.com/paper-details/cad-and-fem-modelling-of-theoretical-roughness-in-diamond-burnishing/12837172729085953-4361>.

10. Ichkova M. Effects of diamond burnishing process parameters on the surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel // *Edelweiss Applied Science and Technology*. – 2025. – Vol. 9, № 4. – P. 1075–1087. – DOI: 10.55214/25768484.v9i4.6174

11. Ferencsik V. Finite element analysis of changing of stress condition caused by diamond burnishing // *Cutting & Tools in Technological System*. – 2024. – № 100.10. – DOI: 10.20998/2078-7405.2024.100.10.

12. Ferencsik V. Influence of diamond burnishing on core height and ten-point height // *Cutting & Tools in Technological System*. – 2024. – № 101.03. – DOI: 10.20998/2078-7405.2024.101.03.

13. Huuki L., Laakso S. Surface improvement of shafts by the diamond burnishing and ultrasonic burnishing techniques // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2017. – Vol. 19, № 3. – P. 246–259. – DOI: 10.1504/IJMMM.2017.084007.

14. Korzyński M., Dudek K., Korzyńska K. Effect of slide diamond burnishing on the surface layer of valve stems and the durability of the stem-graphite seal friction pair // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. 6392. – DOI: 10.3390/app13116392.

15. Maximov J., Dunchева G., Anchev A., Dunchev V., Argirov Y. Sustainable diamond burnishing of chromium–nickel austenitic stainless steels: effects on surface integrity and fatigue limit // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 19. – Art. 9031. – DOI: 10.3390/app14199031.

16. Korzyński M. Experimental models and correlations between surface parameters after slide diamond burnishing // *Measurement Science Review*. – 2018. – Vol. 18, Issue 3. – P. 123–129. – DOI: 10.1515/msr-2018-0018.

17. Ichkova M., Anastasov K., Daskalova P. Governing factors – surface integrity correlations and optimisations of diamond burnishing process of chromium–nickel austenitic stainless steels of the 18/8 type // *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. – 2025. – Vol. 8, № 3. – P. 4136–4149. – DOI: 10.52894/ijirss.v8i3.7450.

18. Zaghaf J., Molnár V., Benke M. Improving surface integrity by optimizing slide diamond burnishing parameters after hard turning of 42CrMo4 steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 128. – DOI: 10.1007/s00170-023-12008-6.

19. Nguyen T.-T., Van A.-L. Multi-performance optimization of the diamond burnishing process parameters for enhanced fatigue resistance of AISI 52100 steel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2024. – DOI: 10.1177/09544089231163407.

20. Sachin B., Rao C. M., Naik G. M., Prasad C. D., Hebbale A. M., Vijeesh V., Rao M. Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S152661251831209X>