

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

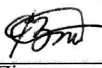
магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс
автомобілів»

на тему: «Вдосконалення технології зміцнення деталей за рахунок
високочастотної обробки поверхні»

Шифр **МРТАМ 2116125. 000 ПЗ**

Виконав: студент 2-го курсу, група МТВАм 20-1  В.О. Фасоля
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник к.т.н., доц. каф. ТАМ.

 О.П. Бабак
Підпис Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.

 О.В. Духа
Підпис Ініціали, прізвище

0 12 2021 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Світньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство

Світньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Духа О.В.

21 жовтня 2021 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Фасолі Владиславу Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові

Тема проекту (роботи) _____

Досконалення технології зміцнення деталей за рахунок високочастотної обробки поверхні

Виконавець проекту (роботи) Бабак Олег Петрович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2021р. № 102 (25)

Строк подання студентом проекту на кафедру 10 грудня 2021 року

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення сліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, фектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки боти при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи триєства.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз способів технологічного забезпечення якості ПШ робочих поверхонь деталей машин; 2 Теоретичне дослідження й моделювання АОЗОКПШ; 3. Методика експериментального дослідження АОЗОКПШ; 4. Дослідження впливу технологічних параметрів процесу АОЗОКПШ на геометричні і фізико-механічні параметри якості ПШ; 5. Практична значимість результатів досліджень.

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на майдані

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання_----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2021</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10. 2021</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2021</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2021</i>	
5	<i>Оформлення презентації магістерської роботи</i>	<i>1.12. 2021</i>	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	<i>5.12. 2021</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.12. 2021</i>	

Студент



 Підпис

Керівник проекту (роботи)



 Підпис

Фасоля В.О.
 Ініціали, прізвище

Бабак О.П.
 Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

На тему: «Вдосконалення технології зміцнення деталей за рахунок високочастотної обробки поверхні»

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах висуваються високі вимоги до довговічності і якості машин. Якість машини визначається, у тому числі і якістю поверхневого шару (ПШ) її деталей.

Основний вплив на експлуатаційні властивості деталей (зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість і ін.) виявляють показники якості ПШ, у тому числі макровідхилення, хвилястість, шорсткість, фізико-механічні властивості.

Максимальна інтенсивність зношування робочих поверхонь деталей спостерігається в процесі їх приробляння. Окре, раціональним є створення в процесі фінішної обробки деталей якості поверхні наближеної до якості, що утворюється в процесі приробляння.

Ціль і завдання дослідження. Метою даної роботи є розробка технологічного забезпечення якості ПШ робочих поверхонь деталей вузлів тертя машин на основі створення нового ресурсозберігаючого способу акустичного ОЗО у квазіпружному середовищу, що дозволяє розширити можливості машинобудівельної галузі в напрямку збільшення терміну служби відповідальних деталей машин.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес АОЗОКПШ, а предметом – структура АОЗОКПШ, закономірності формування якості ПШ деталей.

Наукова ідея роботи полягає в розробці теоретичних основ нової вібраційної ОЗО деталей у квазіпружних середовищах, що забезпечує якість ПШ, що сприяє до збільшення терміну служби деталей.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі виконаний комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямований на створення технології АОЗОКПШ, що забезпечує підвищення загального ресурсу оброблювальних деталей. Наукова новизна отриманих результатів полягає в рішенні актуального науково-технічного завдання – створенні способу АОЗОКПШ і виявленні його впливу на параметри якості оброблених поверхонь.

Теоретично обґрунтований і практично реалізований технологічний спосіб ОЗО, заснований на спільному використанні явища резонансу у звуковому частотному діапазоні та впливі квазіпружного середовища на ПШ деталей, що забезпечує поліпшення їх експлуатаційних властивостей.

Отримано технологічне забезпечення нового способу АОЗОКПШ і виявлені функціональні регресійні залежності між параметрами якості ПШ і режимами обробки, що дозволяє управляти процесом припрацювання.





Удосконалена математична модель для проектування елементів установки для АОЗОКПШ, реалізація якої дозволяє збільшити як коефіцієнт посилення коливань, так і їх амплітуду, ця модель ураховує функціональне призначення оброблюваних деталей.

Структура й обсяг роботи. Магістерська робота складається із вступу, п'яти глав, основних висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 123 сторінок, 81 малюнків, 22 таблиць, 62 літературних джерел і додатку.

Перелік ключових слів: ЗМІЦНЕННЯ, ВИСОКОЧАСТОТНА ОБРОБКА, ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ, ВІБРАЦІЙНА УСТАНОВКА, АМПЛІТУДА КОЛИВАНЬ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПШ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	14
1.1 Аналіз впливу параметрів якості ПШ на термін служби деталей машин.....	14
1.2 Вплив геометричних параметрів ПШ на зносостійкість робочих поверхонь деталей.....	17
1.3 Вплив фізико-механічних властивостей ПШ на його зносостійкість.....	19
1.4 Вибір комплексного параметра якості ПШ для технологічного забезпечення зносостійкості.....	20
1.5 Аналіз впливу процесу приробітки на зносостійкість і формування рівноважної шорсткості.....	22
1.6 Аналіз застосовуваних технологічних процесів для досягнення якості робочих поверхонь деталей.....	24
1.7 Аналіз переваг і особливостей вібраційних методів обробки.....	25
1.8 Теоретичні передумови для розробки АОЗОКПШ.....	28
1.9 Структурна схема роботи.....	33
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ Й МОДЕЛЮВАННЯ АОЗОКПШ.....	35
2.1 Технологічний процес АОЗОКПШ.....	35
2.2 Механізм формування ПШ при АОЗОКПШ.....	40

МРТАМ 2116125. 000 ПЗ				
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроб.		Фасоля		
Перевір.		Бабак		
Реценз.				
Н. Контр.		Рудик		
Затверд.		Диха		
Вдосконалення технології зміцнення деталей за рахунок високочастотної обробки поверхні			Лім.	Арк.
			4	123
ХНУ група МТВАм 20-1				

ВСТУП

На сьогоднішній момент одна з найважливіших завдань технології виготовлення це підвищення надійності й довговічності деталей вузлів тертя агрегатів і машин. Одним з напрямків рішення цього завдання є покращення існуючих і створення нових методів обробно-зміцнюючої обробки (ОЗО) робочих поверхонь деталей.

Довговічність і надійність деталей, агрегатів і машин у цілому, забезпечується в основному якістю робочих поверхонь деталей пара тертя. Тому актуальним напрямком розвитку машинобудування є розробка інноваційного технологічного забезпечення процесів формування поверхневого шару, з високими експлуатаційними характеристиками (сносостійкість, задиростійкість, втомну міцність, антикорозійну стійкість) [8, 11, 25, 9]. Працездатність агрегатів і вузлів машин залежить в основному від технологічного забезпечення заданої якості поверхневого шару, яке направлено формується на фінішних операціях технологічного процесу їх виготовлення [52]. При цьому для раціонального використання трудових і природних ресурсів необхідна розробка високопродуктивних енергозберігаючих технологій.

У процесі експлуатації під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів змінюється стан робочих поверхонь деталей пара тертя. Статистичний аналіз свідчить про те, що 85-90% відмов машин пов'язане зі зношуванням робочих деталей пар тертя [95,110]. За даними досліджень В.В. Блідих, В.В. Ерофєєва, П.Н. Лапшина, В.П. Пономарева, Н.І. Косилова й ін., до 85% усіх відмов деталей машин викликані зношуванням, задирками, мікротріщинами та втомним руйнуванням матеріалу, що починаються з поверхні деталі. Для опор кочення характерне абразивне зношування, для опор ковзання - абразивне зношування-заїдання, для валів - зношування шийок, для корпусних деталей - ушкодження посадкових місць [83].

Резервом підвищення зносостійкості деталей у машинобудуванні є

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання явища резонанса у звуковому діапазоні.

Сучасні вимоги до якості деталей визначають необхідність удосконалення технологій ОЗО відповідальних деталей машин, зорієнтованих на зниження ресурсозатрат на обробку і підвищення її ефективності.

Ціль і завдання дослідження. Метою даної роботи є розробка технологічного забезпечення якості ПШ робочих поверхонь деталей вузлів тертя машин на основі створення нового ресурсозберігаючого способу акустичного ОЗО у квазіпружному середовищу, що дозволяє розширити можливості машинобудівельної галузі в напрямку збільшення терміну служби відповідальних деталей машин.

Для досягнення цієї мети, необхідно розв'язати наступні завдання:

На основі аналізу сучасного стану питання досліджень визначити стан і шляху вдосконалювання технологій забезпечення заданої якості ПШ деталей пара тертя.

Теоретично обґрунтувати і дослідити новий спосіб вібраційної ОЗО малогабаритних деталей, заснований на застосуванні коливань, прикладених від концентратора звукової коливальної системи (ЗКС) безпосередньо до деталі, явищ резонансу і використанні в якості технологічного середовища квазіпружної рідини без абразивного наповнювача.

Розробити методику проектування конструктивних параметрів основних елементів ЗКС запропонованої вібраційної установки, використовуваної для здійснення акустичної ОЗО у квазіпружному середовищі (АОЗОКПШ).

Досліджувати вплив основних технологічних параметрів АОЗОКПШ на геометричні та фізико-механічні параметри ПШ деталей.

На базі експериментальних даних розробити регресійні залежності, що встановлюють зв'язок між технологічними параметрами обробки і параметрами ПШ, що дозволяють технологічно управляти якістю ПШ.

Розробити технологічні рекомендації для практичного застосування результатів досліджень і сформулювати їхнє техніко-економічне обґрунтування.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес АОЗОКПШ, а предметом – структура АОЗОКПШ, закономірності формування якості ПШ деталей.

Наукова ідея роботи полягає в розробці теоретичних основ нової вібраційної ОЗО деталей у квазіпружних середовищах, що забезпечує якість ПШ, що сприяє до збільшення терміну служби деталей.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі виконаний комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямований на створення технології АОЗОКПШ, що забезпечує підвищення загального ресурсу оброблювальних деталей. Наукова новизна отриманих результатів полягає в рішенні актуального науково-технічного завдання – створенні способу АОЗОКПШ і виявленні його впливу на параметри якості оброблених поверхонь.

Теоретично обґрунтований і практично реалізований технологічний спосіб ОЗО, заснований на спільному використанні явища резонансу у звуковому частотному діапазоні та впливі квазіпружному середовищі на ПШ деталей, що забезпечує поліпшення їх експлуатаційних властивостей.

Отримано технологічне забезпечення нового способу АОЗОКПШ і виявлені функціональні регресійні залежності між параметрами якості ПШ і режимами обробки, що дозволяє управляти процесом припрацювання.

Удосконалена математична модель для проектування елементів установки для АОЗОКПШ, реалізація якої дозволяє збільшити як коефіцієнт посилення коливань, так і їх амплітуду, ця модель ураховує функціональне призначення оброблюваних деталей.

Теоретична значимість роботи.

Установлена фізична сутність процесів, що відбуваються в ПШ при здійсненні нового способу АОЗОКПШ, який заснований на примусовому використанні явища резонансу, що виникає при додатку від концентратора ЗКС безпосередньо деталі змушених коливань, що збігаються із власною частотою коливань деталі та використанні в якості технологічного середовища

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

квазіпружної рідини.

Розроблений спосіб АОЗОКПШ дозволяє створити спеціальні принципові схеми і конструкції вібраційної установки та підвищити ресурсроботи деталей.

Розроблена математична модель для проектування елементів уста новки для АОЗОКПШ, а саме – циліндричнопрофільного концентратора ЗКС, що дозволяє забезпечувати максимальну амплітуду коливань для деталей з різних матеріалів і різної конструкції.

Експериментально вперше встановлені регресійні залежності між параметрами якості ПШ і режимами АОЗОКПШ, які дозволяють управляти процесом обробки, і домагатися заданих параметрів ПШ.

Практична значимість роботи.

Розроблене технологічне забезпечення АОЗОКПШ дозволяє змінювати основні характеристики ПШ: мікротвердість на 10-25%, параметри шорсткості на 15-30% для різних матеріалів, що забезпечує збільшення терміну служби деталей машин.

Розроблена методика проектування елементів установки для АОЗОКПШ дозволяє проектувати конкретні варіанти установки для різних типів оброблюваних деталей, що збільшує як коефіцієнт підсилення коливань, так і їх амплітуду.

Запропоновані практичні рекомендації дозволяють проектувати нові технологічні процеси з використанням у якості фінішної обробки АОЗОКПШ.

Методологія й методи дослідження. Теоретичні дослідження проводилися на основі наукових положень технології машинобудування, трибології, теорії планування експерименту і математичного моделювання. Експериментальні дослідження проведені з використанням лабораторної кінтродльно вимірювальної апаратури й спеціально розроблених пристроїв та оснащення.

Положення, що виносяться на захист. На захист виносяться наступні основні наукові розробки й положення:

новий спосіб фінішної ОЗО – АОЗОКПШ;

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наукове положення про те, що при акустичної резонансної ОЗО деталей у якості робочої (квазіпружного) середовища можна використовувати технологічні рідини,

- наукове положення про те, що при впливі квазіпружної рідини на ПШ коливній у резонансному режимі деталі відбувається зміна основних параметрів шорсткості і зміцнення поверхні .

закономірності формування якості ПШ при АОЗОКПШ;

методика і алгоритм синтезу установки для АОЗОКПШ;

регресійні залежності, що дозволяють управляти параметрами якості створюваного ПШ деталі й режимами обробки.

Структура й обсяг роботи. Магістерська робота складається із вступу, п'яти глав, основних висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить --- сторінок, , малюнків, таблиць, літературних джерел і додатку.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливу на зносостійкість при абразивному зношуванні [114].

1.2 Вплив геометричних параметрів ПШ на зносостійкість робочих поверхонь деталей

Макрогеометрія ПШ визначає умови тертя і є важливим фактором, що впливають на працездатність деталей [149]. Хвилямість і макронерівності визначають контурну площу торкання. Наявність хвиль зменшує опорну площа в 5 – 10 раз [149]. Висота хвилястості W_z виявляє більш значимий вплив на зносостійкість ПШ, чому середній крок хвилястості S_w , тому що вона більше позначається на величині опорної площі.

Проведені авторами робіт [65, 75, 86] експерименти показують, що корозійна стійкість деталей поліпшується в міру підвищення ступені плавності і упорядкованості нерівностей поверхні. Хвилястість і напрямки слідів обробки поверхні хоча й впливають на зносостійкість деталей, однак вони менш значні в порівнянні із шорсткістю [13, 18].

Мікрогеометрія поверхонь деталей є одним з основних показників ПШ, що визначають надійність і довговічність виробів при зношуванні всіх видів [63, 98]. Фундаментальні дослідження в області вивчення впливу мікрогеометрії поверхні на конкретні експлуатаційні властивості наведені в роботах Бутенко В.І., Крагельського І.В., Комбалова В.С., Маталіна А.А., Суслова А.Г., Шнейдера Ю.Г. і ін.

Дослідження, виконані Безязичним В.Ф. [13] дозволили встановити, що мінімальна шорсткість поверхні не завжди забезпечує її високу зносостійкість. У результаті досліджень впливу параметрів якості ПШ на зносостійкість у роботі [87] виявлене, що коефіцієнт тертя зростає зі збільшенням висотних параметрів профілю R_a , R_z , R_{max} , і зменшується зі збільшенням відносної опорної довжини профілю t_p і середнього кроку нерівностей S_m . Інтенсивність зношування сполучених поверхонь залежить від величини фактичного контакту і їх

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Давиденкову Н.Н.). Найбільші напруги в поверхні можуть бути як стискаючі, так і розтягують. Особливо небезпечні розтягувальні напруги, які приводять до зниження втомної міцності і зносостійкості. В початку процесу тертя деталі залишкові напруги в ПШ знімаються під дією, що протікаючих пластичних деформацій, не встигаючи виявити помітного впливу на зношування. Одночасно в ПШ виникають залишкові напруги зтискання, які в ряді випадків знижують зношування [17, 31].

1.4 Вибір комплексного параметра якості ПШ для технологічного забезпечення зносостійкості

У процесі експлуатації відбувається взаємозалежна зміна параметрів якості ПШ деталей машин. Тільки технологічне забезпечення раціонального значення комплексного параметра якості ПШ дозволяє в значній мірі підвищити їхню довговічність [34, 36, 51, 60, 62, 95, 129]. Для забезпечення різних експлуатаційних властивостей відповідними методами обробки необхідно розглядати комплексні параметри, що включають параметри шорсткості, хвилястості, макровідхилень, фізико-механічних властивостей [51, 52, 70, 87, 69, 114].

Взаємозв'язок експлуатаційних характеристик деталей машин з параметрами якості їх ПШ представлено в таблиці 1.2.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 - Взаємозв'язок експлуатаційних характеристик деталей з параметрами якості ПШ [1, 115, 156]

Властивість	Метричні показники											Фізико-механічні показники				
	Шорсткість						Макровідхилення		Хвилястість			еп		Напруження		
	Ra	Rz	Rmax	Rm	Sm	Sp	tr	Нmax	Нр	Wz	Wmax	Sw	H	h	h	σ
Зносостійкість:	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
сухе тертя					-											
тертя	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+		-
тертя змащенням	3i	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-		-
Втомна міцність	+	+	+	+	+	-	-	-				-	+	+	+	+
корозійна стійкість	+	+		+									+	+		

(*) - параметри, що виявляють основний вплив на експлуатаційну властивість; (+) параметри, що виявляють вплив на експлуатаційну властивість; (-) параметри, що не виявляють істотного впливу на експлуатаційну властивість.

де: Ra - середнє арифметичне відхилення профілю, мкм; Rz - висота нерівно стей профілю по десятиом крапкам, мкм; Rmax - найбільша висота нерівностей профіля, мкм; Sm - середній крок нерівностей профілю; Rpt - висота згладжування профіля шорсткості; S - середній крок місцевих виступів профілю; tr - відносна опорна довжина профілю; r - радіус закруглення вершин; Wz - висота хвилястості; Wmax - найбільша висота хвилястості; Sw - середній крок

більше вихідної. У загальному і середніх умовах роботи висота нерівностей у початковий період зменшується на 65...75% [59].

Крагельский І.В. встановив, що будь-яка шорсткість після приробляння протягом декількох годин підтверджує характер «рівноважної» [46, 52, 70]. Відповідно тривалість періоду приробітки і зношування в цей період залежать від того, наскільки вихідні параметри ПШ відрізняються від рівноважних. При зменшенні величини початкового зношування і часу приробітки значно зростає тривалість збереження припустимого експлуатаційного зазору до катастрофічного зношування. Процес приробляння можна розглядати як поступове збільшення опорної поверхні і пружної складової деформації контакту, зменшення частки пластичної складової, внаслідок чого сумарне зношування знижується [82].

Для підвищення зносостійкості третьових деталей шляхом зменшення первинного зношування доцільно створювати поверхні ковзання, шорсткість яких відповідає шорсткості поверхонь прироблених деталей.

Професор А.Г. Сулов відзначає, що процес експлуатації деталі можна розглядати як продовження технології її обробки [102]. Тому для підвищення довговічності пар тертя необхідно максимально зменшити їх приробітку при експлуатації. Цього домагаються фінішною обробкою, моделюючи прискорений процес приробляння, який являє собою мікрорізання і пластичні деформації мікронерівностей поверхні [104]. Чим більше вихідна шорсткість робочої поверхні відрізняється від оптимальної, тим більше буде зношування в період приробляння, $\sigma_{Тр}$, тим менше довговічність пари тертя [101]. При менших значеннях шорсткості зменшується величина початкового зношування і час приробітки [15].

У період приробляння показниками якості, що забезпечують максимальні експлуатаційні показники поверхні тертя, є параметри шорсткості, а в період зношування, що встановилося, визначають є показники фізико-механічного стану ПШ [120].

Дослідження зміни мікротвердості в процесі приробляння [59, 129]

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показали, що період приробляння закінчується після досягнення третьової поверхні певному ступеня наклепу.

1.6 Аналіз застосовуваних технологічних процесів для досягнення якості робочих поверхонь деталей

Підвищити експлуатаційні властивості, а відповідно і довговічність деталей у даний момент можливо за рахунок розробки нових ресурсозберігаючих методів зміцнення деталей і вибору оптимальних режимів обробки, що забезпечують задані значення параметрів ПШ [3, 21, 29, 52, 69, 86, 102, 109].

Питанням технологічного забезпечення якості поверхні деталей присвячені роботи А.П. Бабичева, В.Ф. Безязичного, А.В. Боярнікова, В. І. Бутенко, Р.В. Гурова, О.А. Горленко, Н.Б. Демкіна, В.В. Іванова, С.В. Ковалевського, А.Н. Михайлова, Е.Ю. Крупені, Ю.Р. Копилова, А.А. Маталина, А.В. Мицика, В.В. Надуваева, Є.В. Рижова, С.В. Сорокіна, А.Г.Суслова, й ін.

Для підвищення зносостійкості поверхні деталей широко застосовують різні методи механічної оздоблювальної, зміцнюючої і ОЗО. Класифікації способів підвищення експлуатаційних властивостей деталей присвячені роботи

[30, 35, 66, 85, 92, 98]. Останнім часом для підвищення зносостійкості деталей широко застосовують ультразвукову ОЗО [91, 93, 94, 96].

Останнім часом розроблені нові технологічні процеси фінішної обробки, які дозволяють знизити приробоку зношування, підвищити антифрикційні властивості і зменшити час приробляння пара тертя. В основі технологічних методів підвищення зносостійкості лежить явище зміцнення.

Методи ППД не забезпечують оптимальні триботехнічні характеристики обробленої поверхні. Хіміко-термічна обробка, термічна обробка та ППД не дозволяють коректувати технологічну спадковість.

Особливе значення в технологічних процесах виготовлення деталей має ОЗО, що полягає в силовому впливі на поверхню оброблюваної деталі і

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовувана, як правило, на фінішних етапах виготовлення. ОЗО безпосередньо визначає експлуатаційні властивості деталей.

Істотними бар'єрами в технологічному процесі є термічні операції і зміцнюючі операції, що супроводжуються поверхневим зміцненням деталей. Вплив багатьох негативних факторів технологічної спадковості при здійсненні зміцнюючих впливів різко зменшує або взагалі не спостерігається [58,110].

1.7 Аналіз переваг і особливостей вібраційних методів обробки

Серед вібраційних методів перспективною є УЗО [4, 5, 10, 75, 76, 77]. Суть обробки полягає в додаванні змушених коливань деталі.

Колівальні сили, що впливають на метал, ведуть до збільшення щільності дефектів кристалічних ґрат (дислокаційне зміцнення). Установлене, що ультразвукове зміцнення більш стійке до повзучості [107]. Субструктура, отримана ультразвуковим зміцненням, має меншу накопичену енергію, тобто вона є більш рівноважною, чим структура, одержувана при звичайній деформації.

Основам теорії і практики методів УЗО і їх впливу на зносостійкість присвячені роботи дослідників Олійника Н.В., Рижова Є.В., Гур'єва Г.В., Дрозда М.С., Папшева Д.Д., Браславського В.М. і інших.

Великий внесок у розвиток ОЗО ППД внесли: Алексєєв П.Г., Бабичев А.П., Балтер М.А., Белов В.А., Блюменштейн В.Ю., Браславський В.М., Горленко О.А., Гуров Р.В., Кравченко Б.А., Кудрявцев І.В., Одинцов Л.Г., Папшев Д.Д., Розенберг О.А., Смелянський В.М., Суслов А.Г. і ін. Їхніми дослідженнями доведено, що підвищення експлуатаційних властивостей деталей досягається зміцненням поверхневого шару й утворенню в ньому сприятливих початкових технологічних залишкових напружень.

Метод ОЗО ППД є альтернативою процесам абразивної обробки як фінішних операцій. Перевагою методів ППД є їх екологічність, тому що по визначенню при зміцнюючій обробці не відбувається видалення матеріалу і, отже,

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхні деталі. ОЗО ППД (рис. 1.5б) здійснюється з метою зменшення вихідної шорсткості поверхні, збільшення її несучої здатності й часткового зміцнення ПШ деталі. Зміцнююча обробка ППД (рис. 1.5, в) виконується з метою формування регулярного профіля й зміцнення поверхневого шару деталі.

Віброобробка може виконуватися на різних режимах (рис. 1.6.)

Вібраційна обробка одночасно діє на напруги першого, другого й третього роду.

Враховуючи існуючий взаємозв'язок функціонального призначення робочих поверхонь деталей машин з їхньою шорсткістю можна вибрати вид ОЗО ППД для забезпечення різних експлуатаційних властивостей.

ОЗО ППД забезпечує зменшення шорсткості і поліпшення опорних характеристик профілю, і зміцнення ПШ на певну глибину зі створенням стискаючих залишкових напруг у ньому.

При УЗО відбувається змінання виступів від попередньої обробки, утворюється наклепаний шар, виникають залишкові напруги стиску. Фізико-механічні характеристики поверхневого шару при УЗО краще в порівнянні с іншими методами ППД [107]. УЗО створює на оброблюваній поверхні зміцнюючий шар з підвищеною опірністю до утворення тріщин; поліпшує структуру металу й стабілізує її.

В останні роки з'являється велика кількість робіт, присвячених вивченню технології УЗО. Серед них роботи Ю.М. Боровіна, Ю.В.Нікітіна, З.В. Степчевой і ряду інших авторів. Недоліком зазначених робіт є відсутність уваги питанням підвищення довговічності поверхонь деталей.

УЗО забезпечує одержання заданих властивостей ПШ - частково або повністю регулярного мікрорельєфу, створення залишкових напружень стиску в ПШ оброблених поверхонь. Ефективність УЗО визначається головним чином технологічним методом обробки і її режимами.

Вузловим моментом при оптимізації УЗО є вибір або створення такого методу, який не тільки підвищить експлуатаційну довговічність і надійність

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінетика ультразвукового зміцнення визначається інтенсивністю енергії ультразвуковою хвилею, що вводиться в деталь, температурою обробки, хімічним составом оброблюваного матеріалу.

Розміри елементів коливальної системи розраховують таким чином, щоб система працювала в резонансному режимі. Обробка металів ультразвуком з амплітудами, меншими граничних протягом коротких проміжків времени, не викликає зміни властивостей металу. Обробка ультразвуком з амплітудами, що перевищують граничні, може його упрочнить, або викликати разупрочнення.

Для ефективної передачі енергії ультразвукової хвилі оброблюваному виробу в більшості випадків необхідне застосування передатних середовищ, у якості яких використовуються рідини: вода, масло, спирти і т.д.

Найбільш ефективною, з погляду коефіцієнта використання енергії ультразвукових коливань, є схема, що припускає застосування пасивної коливальної ланки. Ультразвукові коливання, проходячи по оброблюваному виробу й пасивній коливальній ланці, відбившись від вольного кінця останнього, вертаються в протилежному напрямку. Звичайно коливальна система розраховується таким чином, щоб фази відбитої й первісної хвиль збігалися. У цьому випадку відбувається посилення амплітуди коливань. Такі схеми застосовуються для обробки виробів, діаметр яких рівний або менше діаметра незакріпленого кінця концентратора.

Зміцнення поверхні за допомогою ультразвуку дозволяє сформувати сприятливий розподіл залишкових напруг і мікрорельєф ПШ. Ультразвукова фінішна обробка в тих випадках, коли не потрібно виправлення погрішності форми, здатна замінити собою процес шліфування [79].

Кавитационные пухирці зароджуються переважно на поверхні поміщених у рідину виробів. При захопывании пухирців відбувається наклеп поверхні деталей. Глибина наклепу, твердість, і зносостойкість наклепанного шару визначаються інтенсивністю енергії ультразвукової хвилі, фізико-механічними властивостями рідини, зокрема, її в'язкістю, сприйнятливістю до наклепу

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

оброблюваних деталей. В окремих випадках ультразвуковим наклепом у рідині можна підвищити зносостійкість деталей в 1,5-1, 8 рази [117].

Деформируемые тіла можуть або кріпитися до хвилеводу або концентратора УЗК, утворюючи ультразвуковий інструмент, або розміщатися в контейнерах.

Як правило, застосовуються низькочастотні коливання (15-100 Гц) і ультразвукові коливання (від 20 кГц). Можливості й область застосування коливань звукового діапазону не виявлені. Рідко застосовуються резонансні коливання. Власні частоти більшості застосовуваних деталей машин лежать саме у звуковому діапазоні, що сприяє створенню резонансу в інтервалі 3-6кГц.

Розширення технологічних можливостей вібраційної ОУО можливо за рахунок використання фізичних ефектів одержуваних при різних схемах енергетичного впливу на деталь і середовище.

Основні витрати енергії в класичних технологіях припадають на роботу пластичної деформації.

Серед найбільш ефективних і універсальних методів оздоблювальної обробки поверхонь деталей особливе місце займає вібраційна обробка [23]. Виброобработка реалізується з використанням різних технологічних середовищ при коливаннях різного спектра, і дозволяє здійснювати спільне віз- дія на поверхневий шар деталі механічної енергії й хімічних процесів у різній їхній комбінації [56]. Виброобработка забезпечує значительную економію матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів.

На сьогоднішній день широко застосовується вібраційна обробка свободной абразивним середовищем. При цьому способі обробки деталі абразивне середовище міститься в коливний резервуар « УоОбразної» форми. При загальному циркуляционном русі відбуваються процеси мікрорізання й упругопластического деформування, змінюються параметри поверхневого шару. [99, 78, 120]

Проведений аналіз процесів ППД і УЗО дозволяє зробити вивід про пер-

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спективності методу АОЗОКПШ. Дана обробка виявляється найбільше ефективною у дрібносерійнім виробництві. Важливим завданням є вивчення впливу параметрів режимів обробки на параметри якості ПШ, а саме мікротвердість, шорсткість, субшероховатість, залишкові напруги. Виникає необхідність у розробці математичних залежностей режимів обробки й параметрів якості ПШ.

Шорсткістю поверхні деталей у процесі АОЗОКПШ можна управляти за рахунок зміни амплітуди й частоти коливань. Найбільш істотні зміни шорсткості поверхні деталей відбуваються при варіюванні величиною амплітуди коливань.

На довговічність деталей впливає комплекс параметрів якості поверхневого шару. На ресурс деталі суттєво впливає споконвічна шерохватість, що визначає час і зношування приробітки. Для підвищення зносостійкості й інших експлуатаційних властивостей деталей необхідно домагатися шерохватості максимально наближеної до рівноважної, із заданими параметрами R_a , t_r і форми нерівностей.

Існуючі технології забезпечення якості ПШ не дозволяють підозити задовільної комбінації заданих експлуатаційних характеристик вузлів тертя із прийнятними технологічністю, знергозатратами, екологічної безпекою й економічністю процесів виготовлення деталей.

У світлі аналізу існуючих методів ОУО видна необхідність удосконалення існуючих і розробки нових методів виброобробки. Недосконалість сучасних технологій і встаткування для ОУО технологічних процесів виготовлення деталей висуває потреба в розробці й проходженні нових високоефективних і продуктивних технологій, сориєнтованих на використання вібрацій, а також необхідність створення здатного реалізувати ці процеси встаткування.

З метою ресурсо- і енергозбереження перспективним є АОЗОКПШ. У зв'язку з вищевикладеним, поставлена мету дисертаційного дослідження є актуальною.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.9 Структурна схема роботи

Структурна схема роботи відбиває основні етапи й шляху рішення задачі створення технологічного забезпечення якості поверхневого шару деталей машин на основі акустичної оброблювально-зміцнюючої обробки у квазіпружних середовищах.

На підставі прийнятих схем технологічних впливів для груп функціональних елементів складаються загальні маршрути обробки, які дозволяють формувати основні операції технологічного процесу.

На наступному етапі проводиться реалізація розробленого технологічного процесу. У процесі реалізації ТП проводиться контроль основних параметрів якості і експлуатаційних властивостей ділянок. У рамках даної роботи проводилися дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару по параметрах мікротвердості й товщини поверхневого шару з покриттям, а також шорсткості робочих поверхонь на етапах їх підготовки до нанесення покриттів.

Висновки по першому розділу

Основним завданням досліджень є підвищення зносостійкості деталей пар тертя, за рахунок формування якості ПШ, що забезпечує раціональну маслоємність, шорсткість і мікротвердість.

Метою даної роботи є розробка технологічного забезпечення якості ПШ робочих поверхонь деталей вузлів тертя машин на основі створення нового ресурсозберігаючого способу акустичної ОЗО у квазіпружному середовищі, що дозволяє розширити можливості машинобудівної галузі в напрямку збільшення терміну служби відповідальних деталей машин.

Для досягнення цієї мети, необхідно розв'язати наступні завдання:

На основі аналізу сучасного стану питання досліджень визначити стан і шляху вдосконалювання технологій ОЗО ПШ деталей пар тертя.

Теоретично обґрунтувати й досліджувати новий спосіб вібраційної ОЗО

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

малогабаритних деталей, заснований на застосуванні коливань, прикладених від концентратора звукової коливальної системи (ЗКС) безпосередньо до деталі, явищі резонансу і використанні в якості технологічного середовища квазіпружної рідини без абразивного наповнювача.

Розробити методику проектування конструктивних параметрів основних елементів ЗКС запропонованої вібраційної установки, використовуваної для здійснення акустичної ОЗО у квазіпружному середовищу (АОЗОКПШ).

Досліджувати вплив основних технологічних параметрів АОЗОКПШ на геометричні і фізико-механічні параметри ПШ деталей.

Розробити технологічні рекомендації для практичного застосування результатів досліджень і сформулювати їхнє техніко-економічне обґрунтування.

					<i>МРТАМ 2116125. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>34</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ Й МОДЕЛЮВАННЯ АОЗОКПШ

2.1 Технологічний процес АОЗОКПШ

Технологічне забезпечення якості поверхні зводиться до вибору метода обробки й розрахунку режимів обробки, що забезпечують одержання заданих параметрів ПШ. Якість ПШ і зносостійкість є визначальними для фінішної ОЗО.

При оброблювально-зміцнюючих операціях для забезпечення якості поверхонь досить вплинути на мікротвердість HV і параметри шорсткості - середнє арифметичне відхилення профілю R_a , середній крок нерівностей S_m , відносну опорну довжину профілю t_p . Формування інших показників якості ПШ (хвилястість, макровідхилення, структура, деякі параметри шорсткості) здійснюється на попередніх операціях технологічного процесу.

АОЗОКПШ ставиться до ОЗО без зняття припуску металу. Тому для досягнення заданої якості ПШ і точних розмірів деталі йому повинен передувати один з видів розмірної обробки різанням. Сутність АОЗОКПШ складається з дії механічних резонансних коливань звукового частотного діапазону на деталь, занурену у квазіпружне середовище.

Операційна послідовність технологічного процесу формуванні ПШ при АОЗОКПШ наступна:

Звуковий генератор формує короткі імпульси звукового частотного діапазону 727-8000 Гц, які подаються на ЗКС.

Від ЗКС заготовці передаються механічні змушені резонансні коливання, що викликають вібрацію деталі з амплітудою до 100 мкм. Повне використання змушеного імпульсного сигналу забезпечує тверде з'єднання деталі з концентратором пезоперетворювачем.

Електричний сигнал із встановленого на заготовці вібродатчика переміщень підсилюється підсилювачем генератора й подається на входи вимірювальника

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апаратури.

У момент виникнення резонансу в системі генератор - деталь проходить різке і максимальне відхилення стрілки мікроамперметра, який фіксується системою керування на базі ПК. Підтримка найбільшої амплітуди коливань здійснюється в ручному режимі за допомогою датчика точного настроювання.

Основним регульованим режимом обробки є тривалість процесу.

Основними технологічними параметрами АОЗОКПШ є:

амплітуда коливальних зсувів, що залежить від параметрів ЗКС, у діапазоні від 30 мкм до 80 мкм;

тривалість обробки, в інтервалі від 10 до 20 хвилин.

По технологічній призначенню АОЗОКПШ ставиться до безрозмірних методів обробки; по виду застосовуваного обробного інструмента - до групи методів обробки технологічним ППД.

АОЗОКПШ характеризується наступними явищами:

динамічним впливом технологічної рідини, що виражаються квазіпружною силою;

механічною взаємодією середовища й матеріалу деталі у вигляді грузлого тертя;

старінням (вібростабілізацією напруг);

кавітаційними процесами.

Процес АОЗОКПШ являє собою складний комплекс механо-фізико-хімічних явищ, що виявляють істотний вплив на стан ППШ оброблювальної поверхні деталі.

Обробка, використовувана для досягнення зміцнюючого й стабілізуючого ефекту, здійснюється в середовищі квазіпружних рідин. Одержання технологічного ефекту визначаються станом обробного середовища і характерними її параметрами. У числі останніх розглядаються: кінематична в'язкість; показник щільності матеріалу; параметри силових зв'язків; дисипативні і квазіпружні властивості середовища.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними параметрами АОЗОКПШ є частота й амплітуда колевань, тривалість обробки. Обов'язковою умовою проведення обробки являє реалізація резонансного режиму коливань. На параметри обробки мають вплив наступний фактори: вихідний стан якості ПШ, склад і в'язкість робочого середовища, вид і розміри концентратора, форма та матеріал деталі.

Формування якості ПШ після АОЗОКПШ викликає зміна механічних властивостей, що підвищує термін служби відповідальних деталей.

Особливість методу полягає в тому, що технологічна рідина легко здобуває форму оброблюваної поверхні, що забезпечує відносну рівномірність ОЗО й можливість обробляти деталі складної форми.

АОЗОКПШ засновано на використанні декількох фізичних явищ одночасно, а саме:

виникнення резонансних коливань деталі при наданні їй вимушених коливань, які збігаються із власною частотою коливань у діапазоні звукових частот (друга або третя гармоніки);

-- взаємодія ПШ деталі із квазіпружним середовищем, яке викликає ефект подібний ППД;

фізико-хімічних змін у ПШ у результаті вібрацій, які зводяться до переорієнтації кристалів, руху дислокацій до границь зерен.

За рахунок вібростабілізації АОЗОКПШ дозволяє досягтися рівномірного рас- прерозподілу дислокацій і внутрішнього напруження ПШ.

Головні відмінності запропонованого способу:

передача змушених коливань самої деталі, а не середовищу, що дозволяє зменшити витрати енергії на здійснення процесу обробки;

відсутність у робочому середовищі твердих робочих часток;

використання явища резонансу протягом усього процесу обробки при регулюванні частоти коливань деталі.

Основні параметри обробки, які потребують вивчення, впливають:

склад і в'язкість робочого середовища;

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

амплітуда й частота коливань взаємодії, що визначають енергію, атомів робочого середовища з оброблюваною поверхнею;

тривалість процесу обробки;

конструкція інструмента – концентратора.

У режимі резонансу значення амплітуди коливань максимальні. При цьому ззовні витрачається мінімум енергії в підтримку резонансу, а в систему поступають максимум зі спрямованої енергії. Шорсткість і кристалічна структура поверхні регулюється відповідними режимами обробки.

Обробка в пружному середовищі дозволяє одночасно обробляти всі поверхні деталей, на розробленій установці можна обробляти деталі складної геометричної форми при мінімальним енергоспоживанні, високої продуктивності, екологічності.

При обробці створюються умови взаємодії деталі з навколишнім середовищем наближені до умов експлуатації. Процес являє собою обробку ППД при коливаннях деталі в технологічній рідині. Теоретична модель АОЗОКПШ являє собою залежність визначальна силу опору переміщенню деталі в технологічній рідині. Взаємодія ПШ із прикордонним шаром технологічної рідини визначає пластичну деформацію. Вплив тіла на робітниче середовище визначає опір середовища, тобто відбирає імпульс у тілі.

Діючу на тіло силу можна розкласти на силу лобового опору, спрямовану убік, протилежну руху тіла, і силу бокового тертя, перпендикулярну до цього напрямку.

Тому що робоче середовище нерухливе, зворотно-поступальне переміщення тіла не виявляє впливу на вилучені шари рідини. Взаємодія відбувається тільки із граничним шаром технологічної рідини, що безпосередньо стикаються з тілом.

Схема технологічного забезпечення якості поверхні при АОЗОКПШ представлено на рис. 2.2

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формотворні напруги в ПШ виникають під впливом сили грузлого тертя, квазіпружної сили і кавітаційних процесів. Сила, що діє на тіло, що робить змушені коливання у квазіпружним середовищем:

$$F=F_{\text{тр}} + F_{\text{кв}} + F_{\text{кав}}, \quad (2.1)$$

$$F_{\text{тр}}= -k_1V, \quad (2.2)$$

$$F_{\text{кв}}= -k_2A,$$

де k_1 – коефіцієнт опору середовища, залежить від в'язкості середовища η і площі дотичних поверхонь S : $k \sim \eta S$; V -швидкість заготовки; k_2 – коефіцієнт квазіпружної сили ; A – амплітуда; знак мінус указує на протилежний напрямок вектора сили та зсуву.

Формована в процесі операцій фінішної обробки мікрогеометрія ПШ у значній мірі визначає довговічність деталей. У деяких випадкахх необхідно поліпшити якість вже сформованого ПШ. Для цього застосовують способи ОЗО спеціальними обробними середовищами, наприклад квапружним. Застосування як обробне середовище технологічної рідини дозволяє підвищити продуктивність.

Завданням даної роботи є обґрунтування ефективності акустичної оздоблювально-зміцнюючої обробки у квазіпружних середовищах.

У процесі коливань деталі в поверхневому шарі виникають напруги, які викликають пластичну деформацію, посилювані в результаті взаємодії з навколишнім середовищем. Деталь у процесі коливань впливає на частині середовища, які прилягають до поверхні. Моделюється процес експлуатації. У результаті взаємодії з деталлю, у робочому середовищі виникають пружні сили.

При взаємодії з робітничим середовищем профіль ПШ деталі пластично деформується. За рахунок зменшення висотних параметрів і збільшення крокових параметрів шорсткості, заокруглення радіусів вершин і збільшення опорної площі, мікрогеометрія поверхні наближається до рівноважного (експлуатаційному) стану.

										Арк.
										41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116125. 000 ПЗ					

У процесі коливань у ПШ деталі виникають сприятливі залишкові напруги стиску, посилювані за рахунок взаємодії із квазіпружним середовищем і сприятливі підвищенню втомної міцності й зносостійкості деталі.

АОЗОКПШ як комбінований спосіб включає вібростабілізуючу обробку й ОЗО. При відсутності абразивного складового робочого середовища при обробці оксидна плівка поверхні не руйнується, відбуваються мікропластичні деформації.

В основі формування ПШ при АОЗОКПШ лежить комбінація трьох процесів: 1) механізм кавітаційної ерозії, 2) грузле тертя; 3) дія квазіпружного середовища.

При обробці деталей у квазіпружному середовищі на їхніх поверхнях виникають знакозмінні напруги розтягання й стиску. Дані напруги призводять до утворення й захопування кавітаційних пухирців, що відповідно викликає кавітаційну ерозію. Діапазон коливань (середня частота зриву каверн), при яких можливий процес кавітаційного зношування, лежить у межах від 5 до 10 кГц. Найбільш інтенсивні тональні складові коливани лежать у частотному діапазоні від 800 до 8000 Гц [136]. Частота зіткнення мікроструменів технологічної рідини при утворенні кавітаційних каверн досягає тисяч герців. При цьому сили, що викликають кавітацію, представляють собою високочастотні коливання тиску з великою амплітудою. При вібраційній обробці у квазіпружному середовищу поверхня деталі створює хвилі тиск звукового діапазону з амплітудою 40-100 мкм. ПШ шар формується під дією періодичних зіткнень порядку 10⁸-10¹⁰ МПа. Схема кавітаційного руйнування включає три етапи: зміцнення матеріалу - зміна рельєфу поверхневих шарів - відділення часток матеріалу з поверхні взаємодії технологічної рідини й робочої поверхні деталі. При АОЗОКПШ використовуються перші два етапи, третій етап виключається.

Процес АОЗОКПШ включає дві стадії процесу: - інкубаційний період, при якому відбуваються або зміни геометричних і фізикомеханічних параметрів ПШ не фіксуються; - період деформаційного зміцнення й формування регулярного мікрорельєфу наближеного до рівноважного. Період руйнування ПШ властивий

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методам ультразвуковий ОЗО й методам обробки в рідких середовищах при АОЗОКПШ не здійснюється у зв'язку з обмеженими напругами в ПШ.

Формування мікрорельєфу поверхні оброблюваної деталі проходить при взаємодії деталі і технологічної рідини, викликаному дією спрямованих вібрацій, повідомлюваних деталі. При цьому, за певний проміжок часу, відбувається поступова зміна параметрів ПШ (R_a , R_v , S , S_m) і заокруглення вершин мікронерівностей.

За результатами попередніх досліджень впливу процесу АОЗОКПШ на якість ПШ виявлене зниження висоти мікронерівностей на 0,2-0,3 мкм залежно від марки матеріалу зразків особливість ОЗО деталей у квазіпружних технологічних рідинах полягає в забезпеченні мікропластичної деформації мікронерівностей поверхні деталі. ОЗО обробка впливає на шорсткість і мікротвердість оброблюваної поверхні. На зовнішній поверхні деталі при АОЗОКПШ збільшуються стискаючі напруги.

При АОЗОКПШ відбувається взаємне зіткнення і ковзання поверхні з технологічною рідиною. При короткочасних ударних умовах навантаження квазіпружне середовище здобуває властивості твердого тіла. Робоче середовище розглядаємо як однорідне тіло. Опір середовища визначається її в'язкістю. У результаті багаторазового впливу за рахунок опору переміщенню робочого середовища й оброблюваної поверхні формується мікрорельєф, утворюється наклеп і знімаються залишкові напруги.

Проведені дослідження свідчать про можливість застосування для фінішної обробки поверхонь деталей пара тертя АОЗОКПШ робочих середовищ із різними наповнювачами (вода, розчини води, масло індустріальне). Застосування звукових резонансних коливань і різних робочих квазіпружних середовищ дозволяє розширити номенклатуру способів фінішної обробки деталей. Тому завданням справжніх досліджень було обґрунтування ефективності віброобробка деталей АОЗОКПШ, зокрема в індустріальному маслі з наповнювачем, що залежать від матеріалу зразків.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними показниками АОЗОКПШ є: певні параметри шорсткості, мікротвердість і залишкові напруги. У результаті співударів робочої поверхні з робочим середовищем відбувається заокруглення гребінців мікронерівностей. Під продуктивністю АОЗОКПШ розуміється інтенсивність досягнення заданих параметрів у результаті мікрозгладжування.

Враховуючи, що використання енергії УЗ поля пов'язане з виникненням звукокапілярного ефекту і релаксацією залишкових напруг поверхневого шару металів, можна припустити можливість впливу УЗК на ступінь прояву ефекту Ребіндера в процесах АОЗОКПШ. Ефект Ребіндера може проявлятися в різному ступені і формі – від полегшення пластичного деформування до значного зниження міцності. Умови обробки при АОЗОКПШ дозволяють технологічному середовищу полегшити процес технологічного ППД.

2.3 Розробка структурно-функціональної моделі забезпечення якості ПШ при АОЗОКПШ

Якість виробів, продуктивність і економічні показники технологічних процесів виготовлення деталей залежать від режимів ОЗО. Не обходні режими ОЗО, що дозволяють забезпечити задану якість ПШ (мікротвердість, шорсткість, глибину зміцненого шару і т.д.) при максимальній продуктивності й мінімальних витратах. Вибір параметрів АОЗОКПШ повинен передбачати можливість швидкої адаптації режимів ОЗО до властивостей деталі й умовам виробництва.

Важливою обставиною при математичному моделюванні ТП АОЗОКПШ для забезпечення якості ПШ є вибір критеріїв якості обробки визначальних експлуатаційні характеристики деталей. У якості даних критеріїв доцільно використовувати мікротвердість, глибину зміцненого шару й шорсткість ПШ.

Комплекс вимог при розробці ТП ОЗО деталей способом АОЗОКПШ представлено на рис. 2.4.

Метою АОЗОКПШ є досягнення необхідного якості й експлуатаційних

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостей ПШ із мінімальною собівартістю й часом обробки. Функціонування системи ОЗО проявляється в детермінованому зв'язку через процес обробки між вхідними й вихідними параметрами. Параметри процесу обробки визначаються сукупністю кінематики і фізичних явищ у зоні обробки. Механіка процесу описує умови взаємодії технологічної рідини з оброблюваною поверхнею з обліком пружної й пластичної деформації, тертя, квазіпружних сил.

У результаті обробки формується якість поверхні і її експлуатаційні характеристики. Основним параметром, що характеризують протікання процесу обробки є сила, що має нормальну й тангенціальну складові й визначальна параметри деформуємого шару.

Модель методу ОЗО може бути представлена у вигляді технологічної системи, що включає наступні структурні елементи: зовнішня навколишня середовище, зовнішні й внутрішні властивості об'єкта моделювання.

Для опису методу ОЗО використовуємо вербальну структурно-функціональну модель характеризуємо внутрішніми, зовнішніми властивостями системи й властивостями зовнішнього навколишнього середовища (умови функціонування). Процес обробки як об'єкт представлений у вигляді узагальненої структурної й функціональної схем. Об'єкт управляється, і на нього впливають різноманітні зовнішні впливи й обмеження.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математична модель технологічного процесу АОЗОКПШ в узагальненому виді може бути представлена у вигляді сукупності залежностей, відображаючі закономірності, властиві АОЗОКПШ:

$$E = f(x_i, y_i) \quad (2.3)$$

де E - очікувана ефективність (цільова функція); x_i - керовані змінні (частота, амплітуда, час); y_i - некеровані змінні (хімічний склад металу, вихідна мікроструктура ПШ, технологічна спадковість).

Розробка алгоритму керування такої моделі виходить при визначенні значення x_i як функції y_i , що призводить до екстремуму E .

Заданими параметрами є: марка металу деталі, вихідні значення мікротвердості й шорсткості, конструктивні параметри деталі.

Керуючими параметрами є амплітуда й частота коливань, час обробки, обсяг контейнера.

Зміною цих параметрів у певних межах можна забезпечити необхідні значення по показниках глибини зміцненого шару, мікротвердості й параметрів шорсткості при АОЗОКПШ.

До випадкових параметрів ставляться зовнішні умови функціонування ТП: температура, вологість навколишнього середовища, кваліфікація робітників, технологічна спадковість, що передують обробка поверхонь.

Якість технологічної системи визначається вихідними параметрами: мікротвердість, шорсткість ПШ, глибина зміцненого шару, технологічна собівартість. Один із цих параметрів або їх комбінація являє собою показник якості (функцію мети) проектованого процесу. Метою формування процесу АОЗОКПШ є приведення показника якості до екстремуму. Інші вихідні параметри повинні підтримуватися в певні задані межах.

Протікання ТП АОЗОКПШ відбувається в умовах обмежень різної природи: фізико-хімічні й механічні властивості матеріалу ПШ, дефекти поверхні,

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заданих кінцевих параметрів оброблюваної поверхні в результаті її мікрозгладжування.

Ефективність обробки може виражатися через показники поліпшення й економічні показники (цільові функції):

$$HV=F1(A t)- \max \quad (2.7)$$

$$Ra= F2(A t)-\text{равн.} \quad (2.8)$$

$$ЗсС- \min \quad (2.9)$$

Якісні показники обробки визначаються амплітудою коливань і часом обробки. Собівартість визначається поточними витратами і значеннями основного, допоміжного і часу технічного обслуговування.

Прийmemo комплексний показник, що відображає якісні й кількісні закономірності, властиві процесу АОЗОКПШ:

$$E=F(h, HV, Ra)-\max$$

де E-очікувана ефективність (цільова функція).

Взаємодія ПШ деталі із квазіпружної середовищем при АОЗОКПШ

Технологічну рідину розглядаємо, як грузлу нестисливу однофазну рідину і використовуємо метод, використовуваний у механіку однофазних рідин.

Товщина прикордонного шару рідини залежить від в'язкості рідини. Теоретично досліджувати вібраційні переміщення деталі в технологічній рідині - складне завдання.

Одержимо математичну модель для процесу вібраційної обробки деталі закріпленої на концентраторі ЗКС у нерухливому контейнері, заповненою технологічною рідиною. Оброблювані деталі коливаються вертикально з амплітудою резонансних коливань звукового частотного діапазону.

Процес обробки являє собою технологічне ППД, при коливаннях деталі в технологічній рідині (ТР). ОTRe, описати даний процес потрібно залежністю визначальною силу опору коливанням деталі в технологічній рідині. Вплив прикордонного шару визначає ППД і визначає опір технологічної рідини.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо вид залежності для опору руху тіла в ТР, відповідає випадку вертикального проникнення його в цей матеріал.

Сила опору коливанням тіла в рідині являє собою силу грузлого тертя, викликану тертям часток рідини про бічну поверхню тіла. Згідно з механікою рідкого середовища, якщо рух тіла в середовищі супроводжується тільки тертям рідини про бічну поверхню, то загальний опір руху тіла в середовищі визначається першим ступенем швидкості відносного руху тіла.

При русі деякого тіла в ТР прикордонний шар цієї рідини до поверхні тіла буде здобувати деяку швидкість (імпульс), що в кінцевому підсумку й обумовлює певну силу опору.

Для визначення сили грузлого тертя застосовують формулу

$$F_c = a x \rho_j / 2 S a f \quad (2.11)$$

де $a x$ — коефіцієнт опору середовища; ρ_j — щільність рідини, $S a$ — площа поперечного перерізу деталі, a — амплітуда коливань, f — частота коливань деталі.

Якщо прийmemo, що деталь у процесі вібраційного впливу має тільки лінійні переміщення у вертикальному і поздовжньому напрямках, а кутові переміщення враховувати не будемо, сила рідинного тертя в цьому випадку визначиться спрощеною залежністю:

$$F_c = \mu / h S a f \quad (2.12)$$

де μ — в'язкість рідини; S — площа поверхні деталі, яка торкається з лотком; h — товщина прикордонного шару; a — амплітуда коливань, f — частота коливань деталі.

2.4 Дифузійна модель опису процесу зміцнення й обробки ПШ технологічним ППД у квазіпружної середовищу

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116125. 000 ПЗ				

$$C=x \exp(-P.r) \quad (2.14)$$

Це відповідає термодинамічному опису деформованого твердого тіла.

Характер насичення ПШ обумовлений обмеженістю атомів домішок, здатних дифундувати в ПШ при АОЗОКПШ і переходом частини домішок у пластифіцирований і аморфізований шар у результаті хімічної реакції з утворенням карбідів металоїдів.

2.5 Структурно-енергетичний аналіз процесу обробки ПШ АОЗОКПШ

По сучасних оглядах [4-8] пластична деформація ПШ являється кінетичним процесом, який відбувається у формі одиничних елементарних актів на мікрорівні, а потім проявляється у вигляді макроскопічного ефекта [48].

Виходячи з енергетичної сутності явищ, що протікають у ПШ деталі при технологічному ППД під час АОЗОКПШ, основним параметром, визначаючим структуру й параметри ПШ, є щільність потенційної складовою внутрішньої енергії E_p , що накопичується в матеріалі ПШ.

Ріст мікротвердості ПШ впливає на експлуатаційні властивості деталей і на процес зміцнення. Зміна твердості впливає на здатність металу накопичувати додаткові ушкодження структури. Зміцнений метал менше деформується при кожному наступнім коливанні, і через певний час обробки, при досягненні максимально можливої мікротвердості, при даних режимах обробки процес зміцнення ПШ.

Мікротвердість ПШ є основним параметром, який дозволяє побічно визначити щільність схованої енергії.

Ґрунтуючись на залежності, запропонованої в [32] рівняння, що зв'язує енергетичний параметр деформації верхнього шару металу, для АОЗОКПШ буде мати такий вигляд:

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{уд} = K A f^{60/2000}, \text{ кДж/м}^2\text{хв} \quad (2.15)$$

де: K - коефіцієнт, що враховує нерівномірність енергетичного впливу положення, що залежить від розмірів деталі й, оброблюваних поверхонь щодо напрямку вібрацій; f - частота коливань, Гц; A - амплітуда колевань, м.

Виходячи з діапазонів частоти 727-8000 кГц і амплітуди 50-80 мкм значення $E_{уд}$ будуть у межах 280-300 кДж/м²хв.

2.6 Кавітаційні процеси при АЗОКПШ

Механізм впливу ультразвукової кавітації на зміну структури й властивостей ПШ оброблюваних поверхонь на сьогоднішній момент вивчений мало.

У процесі роботи ЗКС у звуковому частотному діапазоні в прикордонному шарі рідини розвиваються кавітаційні процеси, що супроводжуються утворенням кумулятивних струменів рідини в результаті зхлопування кавітаційних пухирців, формуванням ударних хвиль, генеруємих із зони зхлопувань пухирців і виникненням колективної ударної хвилі. При захлопуванні кавітаційного пухирця виникає ударна хвиля, що розбудовує значний тиску. Багаторазовий вплив в одній і тій же області великого кількості окремих пухирців, що захлопуються, приводить до підвищення щільності дислокацій, яке носить накопичувальний характер. На початку впливу пухирців на поверхні переважають пружні деформації, потім, накопичуються по величині, деформації стають пластичними й при підвищенні критичних значень деформації може відбутися руйнування металу, яке відбувається шляхом поділу матеріалу на макроскопічні частини.

При обробці робочих поверхонь деталей необхідно забезпечити режими ультразвукової обробки, які забезпечили б максимальний рівень зміцнення конструкційних сталей без порушення цілісності поверхні.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи, що побудована раніше механічна модель має 9793 вузлів, одержуємо значення вузлового навантаження рівне 0,153 Н.

При розрахунку власних частот коливань були розглянуто два варіанти закріплення зразка: 1) по торцевій поверхні; 2) по торцевому і циліндричному поверхням.

Отримані значення частот коливань представлено в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Моді зразка, отримані з використанням програми COSMOS2Mver 2.7

№ моди	Резонансна частота, Гц Характер моди		
	Варіант кріплення	Варіант кріплення	
	№1	№2	
1	2692	1025 Простій вигин	
2	2697	1025 Простій вигин	
3	10537	5706 Крутіння	
4	14250	6306 Складні й вигин	

1-я й 2-я власні частоти близькі й відповідають коливанням у площинах ХУ і ХZ. 3 і 4-я гармоніки мають більш складний характер коливань.

Форми мод деталей на резонансних частотах змусених коливань деталі звукового діапазону показані на рис. 2.7.

Для підтвердження даних отриманих аналітичним шляхом був проведений експеримент по визначенню власних частот коливань зразка. У середовищі Powergraph-unttled був отриманий спектр експериментального сигналу, з використанням розкладання в ряд Фур'є, (рис 2.8). Власні частоти зразка, отримані розрахунковим і експериментальним шляхом, збігаються з точністю 95%.

Отже, вібраційна установка дозволяє одержувати достовірні дані при дослідженні резонансної частоти коливань системи.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатаційні характеристики поверхні.

2.7.2 Розрахунок статичного і динамічного навантаження зразка досліджень

Визначення реакцій по граничних умовах для прецизійної деталі в прямокутній системі координат практично неможливо, тому що потрібен облік тангенціальних деформацій і переміщень, які відбуваються в елементах регулятора швидкості. Тому граничні умови розглядаються в полярній системі координат.

Розрахунок значень переміщень і напруг для випадку статичного навантаження.

Навантаження розподіленим навантаженням, чисельно рівної силам інерції представлено на рис. 2.9. З розрахунків видно, що напруги пов'язані з деформаціями.

Динамічний розрахунок виконаний для випадку імпульсного додатка розподілу навантаження (рис. 2.10).

Із проведеного динамічного розрахунку для випадку імпульсного додавання навантаження тривалістю імпульсу $2,5 \cdot 10^{-6}$ с впливає, що в оброблюваних деталях виникають напруги порядку 15-30 МПа.

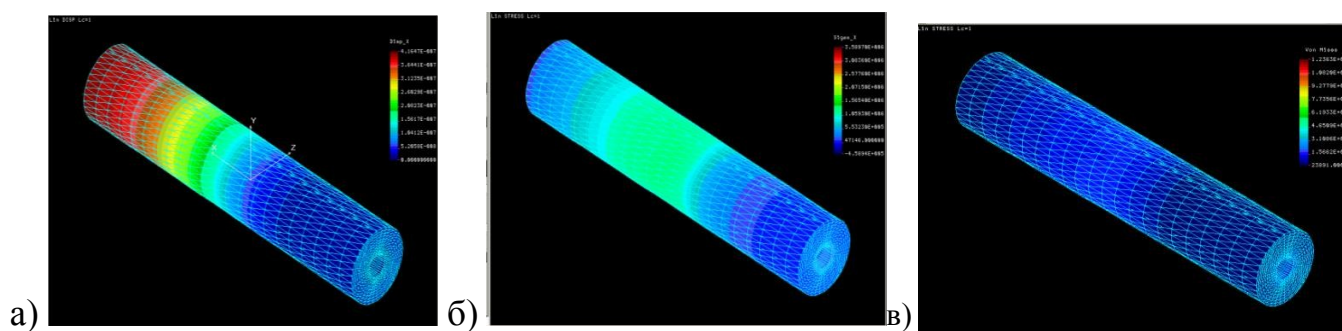
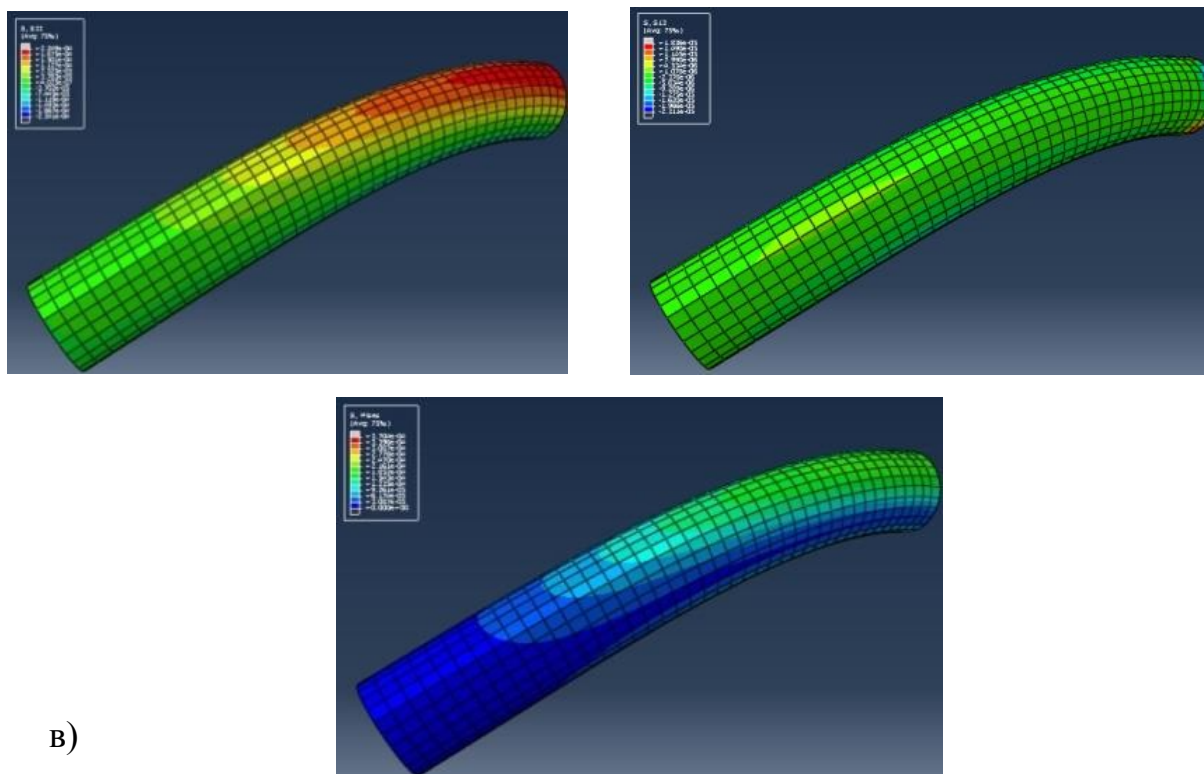


Рисунок 2.9 - Статичний розрахунок напруг без опору середовища: а) деформації зразка уздовж його довжини; б) поздовжні нормальні напруги; в) еквівалентні напруги по мізесу

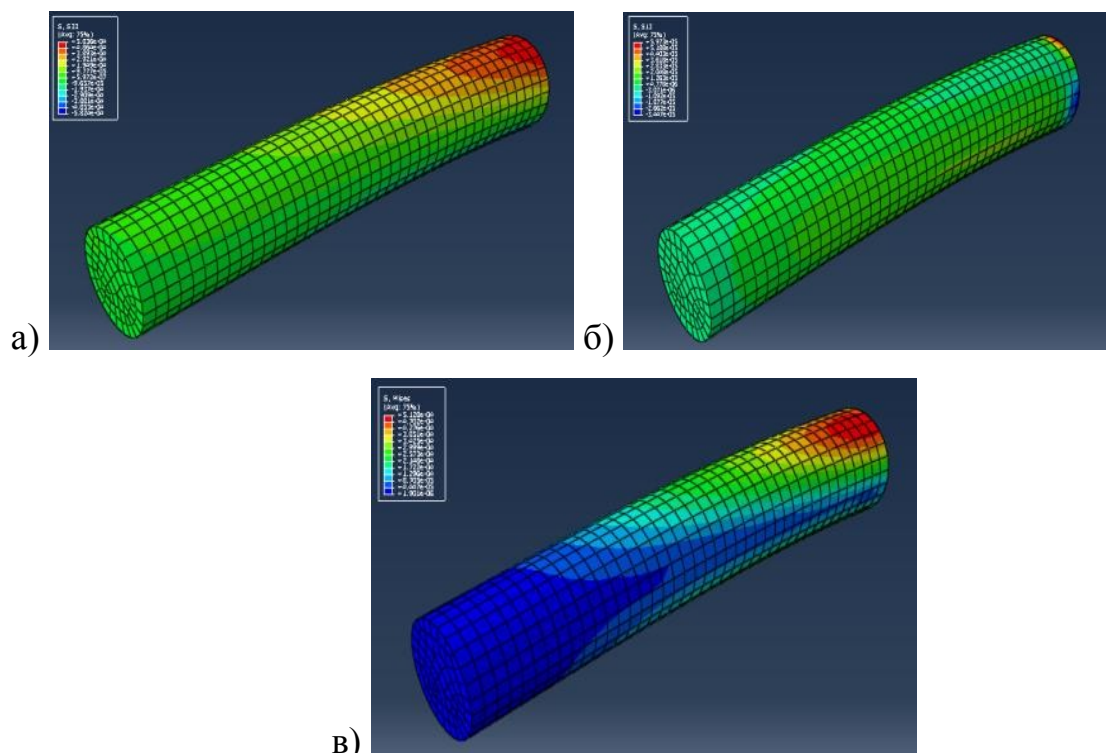
					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

причому амплітуди коливань при цьому знижуються.



в)

Рисунок 2.12 - Динамічний розрахунок без обліку сил тертя: а) поздовжні напруження; б) дотичні напруження; в) напруги по Мізесу.



а)

б)

в)

Рисунок 2.13 - Динамічний розрахунок з урахуванням сил тертя: а) поздовжні напруги; б) дотичні напруження; в) напруги по Мізесу.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Висновки по другому розділу

При АОЗОКПШ у результаті сукупності впливу сил тертя, квазіпружної сили і кавітації на ПШ виникають напруги 45-50 МПа, що викликають процес технологічного ППД на поверхні деталі.

При коливаннях деталі в резонансному режимі в технологічній рідині, напруги, що виникають у ПШ, збільшуються на 40 %.

Методика вибору геометричних розмірів концентратора в залежності від форми, розмірів і матеріалу оброблюваної деталі дозволяє збільшити амплітуду коливань до 100 мкм.

Зміцнення сталеві поверхні при АОЗОКПШ обумовлене формуванням у ПШ розвиненої дислокаційної структури, здрібнюванням зерна і мікронапругами.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АОЗОКПШ

3.1 Розробка вібраційної установки для здійснення АОЗОКПШ

Експериментальні дослідження присвячені проведенню АОЗОКПШ деталі і визначенню зміни якості ПШ при цьому. Для експериментального підтвердження результатів отриманих у другому розділі необхідно створити вібраційну установку для АОЗОКПШ.

Основною метою експерименту є завдання - визначити вплив режимів обробки, складу робочого середовища, конструкції концентратора на якість ПШ.

Запропонована технологія АОЗОКПШ стала основою створення експериментальної вібраційної установки. Принцип роботи установки заснований на збудження змушених механічних коливань у режимі резонансу.

Для АОЗОКПШ розроблена вібраційна установка (рис. 3.1 - 3.2), що включає: електронний генератор імпульсів звукового частотного діапазону коливань (ЗГ 01); звукову коливальну систему (ЗКС) на базі пьезопретворювача енергії електричних коливань в енергію пружних коливань звукового частотного діапазону, жорстко закріплену на рамі установки; електроний і вібровимірний цифровий осцилограф, віброметр ПІ-19 і систему керування на базі персонального комп'ютера (ПК). Переваги запропонованої віброустановки перед існуючими наступні: низька собівартість, робота в енергозберігаючому режимі, простота конструкції.

Робота вібраційної установки здійснюється в такий спосіб. До концентратора пьезопретворювача втулкою із двостороннім різьбленням кріпиться деталь. ЗГ 01 виробляє електричну енергію звукової частоти, яка надходить на пластини пьезопретворювача й перетворюється в механічні коливання хвилеводу-концентратора. Безперервні дискретні коливання звукового частотного діапазону заготовки збуджуються пьезопретворювача, який

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

харчується від електронного генератора звукових коливань.

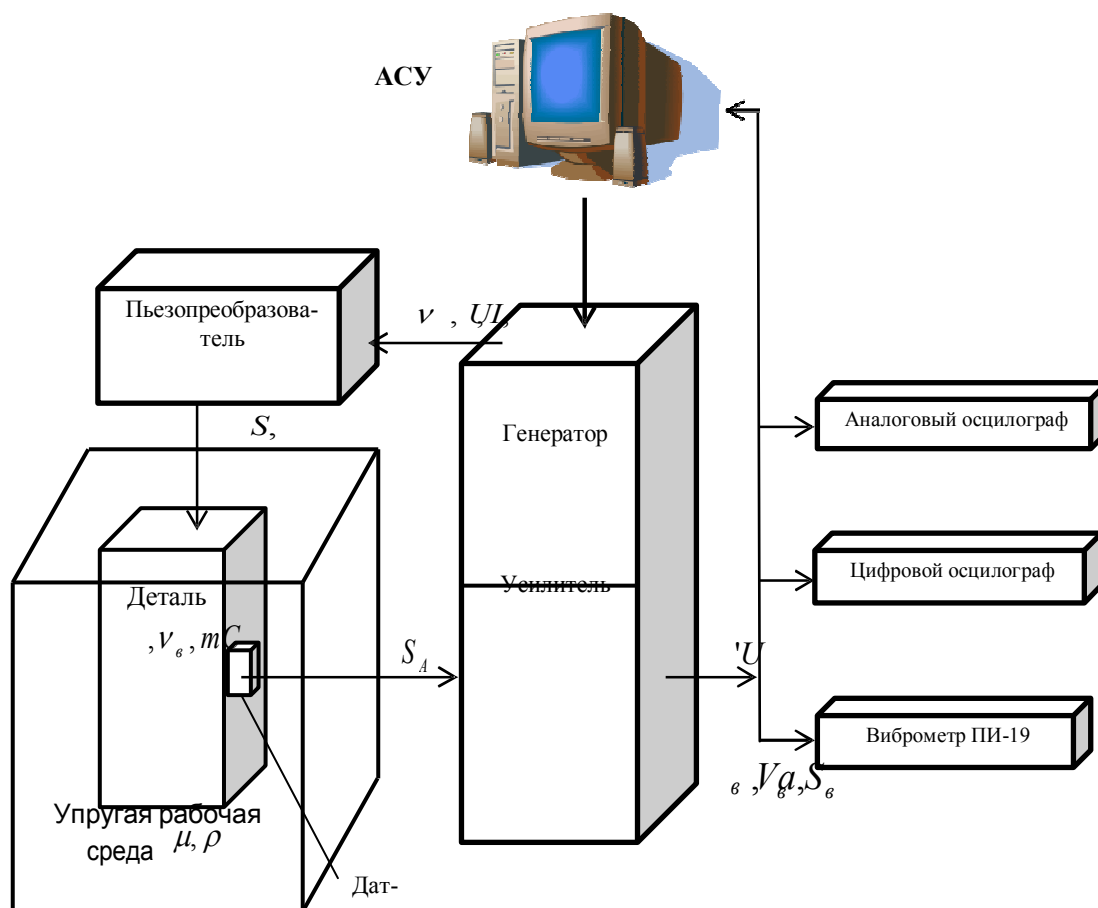


Рисунок 3.1 - Схема вібраційної установки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРТАМ 2116125. 000 ПЗ

Арк.

65

генератора: 1 - автоматичний вимикач; 2 – вольтметр для контролю напруги харчування генератора; 3 - амперметр для контролю струму живлення генератора; 4 – кнопка «ПУСК»; 5 - кнопка «СТОП»; 6 - рознімання для підключення пезоперетворювача; 7 - тумблер « РОБОТА-КОНТРОЛЬ»; 8 - тумблер «Мережа» для включення напруги мережі джерела живлення ланцюгів керування; 9 - запобіжник для захисту джерела живлення ланцюгів керування; 10 - лампа контролю мережі ланцюгів управління; 11 - рознімання для підключення осцилографа і інших приладів; 12 - регулятор «ЧАСТОТА ТОНКО»; 13 - регулятор «ЧАСТОТА»; 14 - рознімання - для підключення пезодатчика; 15 - регулювальник «ЧУТЛИВІСТЬ» для чутливості підсилювача пезодатчика; 16 - мікроамперметр індикатор резонансу; 17 - рознімання для підключення мережі живлення ланцюгів керування ~220 В; 18 - рознімання для підключення напруги живлення генератора ~65В.

Загальний вид передньої панелі представлено на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд передньої панелі генератора

Структурна схема генератора ЗГ 01 наведено на рис. 3.5. Генератор складається з наступних функціональних вузлів: випрямляч генератора, тиристорний генератор, схема захисту по струму генератор, що задає, формувач

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

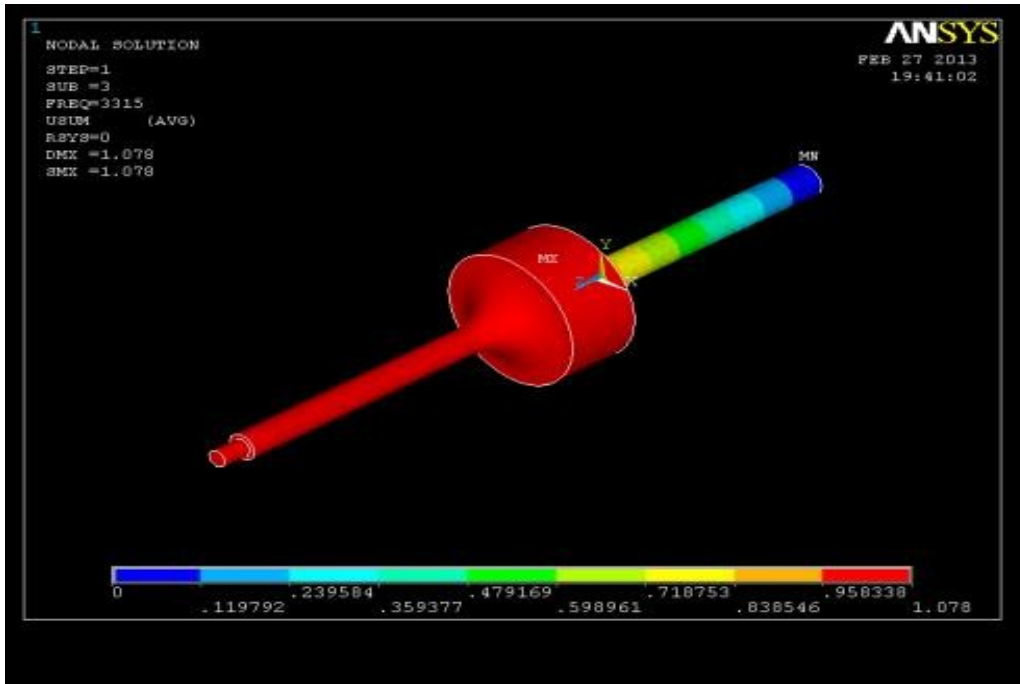
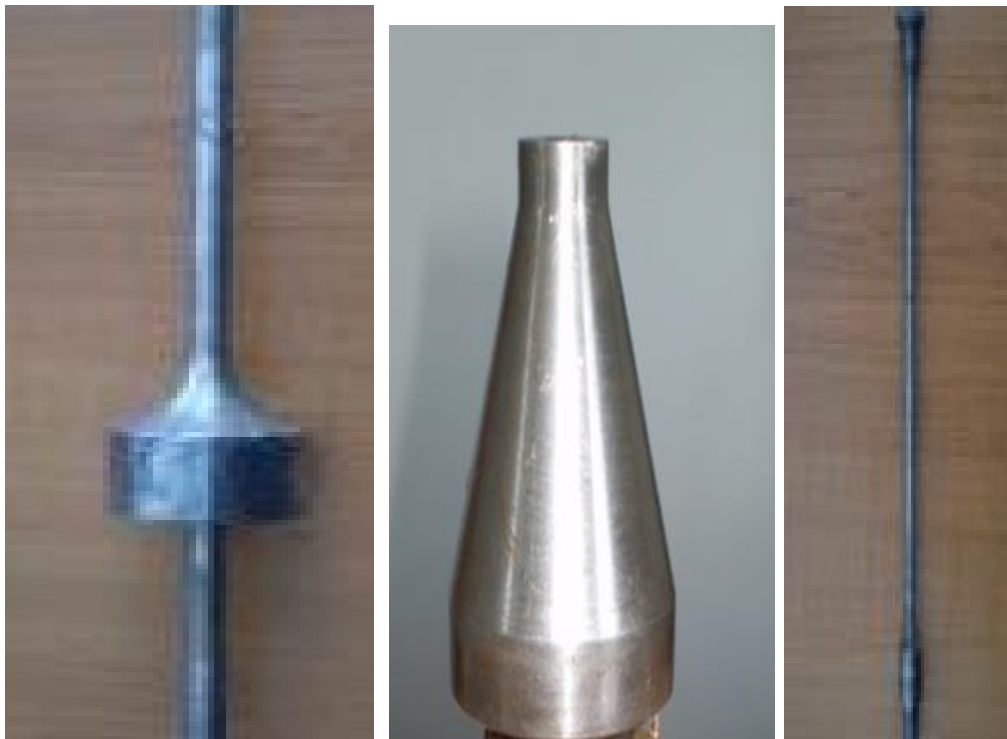


Рисунок 3.12 - Розподіл зсувів σ на резонансній частоті

3.5 Вибір концентратора

У ЗКС використовувалися концентратори-хвилеводи 3 видів (рис. 3.15).



а)

б)

в)

Рисунок 3.15 - Концентратори ЗКС: а) №1, профільно-циліндричний, б)

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

№2, конусоподібний; в) №3, циліндричний.

3.6 Прилади і пристосування для вимірювань у процесі досліджень

Вимір шорсткості поверхні оброблюваної деталі проводилися на портативному профілометрі-профілографі типу TR-200, розробленому компанією Time Grouping (рис. 3.16). Профілограф-Профілометр призначений для виміру більш 15 параметрів шорсткості, візуального й графічного відображення результатів вимірів, статистичної обробки за допомогою високопродуктивного комп'ютера або персональної ЕОМ через послідовний інтерфейс, з можливістю виводу результатів на друкуючий пристрій. Вимірювані параметри шорсткості: Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rmax, Rv, Rz3, Rs, Rsm, Rsk, Rmr, вихідний профіль (P), тр.



Рисунок 3.16 - Цифровий профілометр-профілограф типу TR-200

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Твердість оброблюваної поверхні деталі вимірялася приладом марки електронний твердомір малогабаритний ЕТМ-01 (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 - Твердомір ЕТМ-01

Діаметр і номінальні розміри зразків вимірялися мікрометром DSWQ0-100II з точністю 0.001 мм (рис. 3.18). Діапазон виміру від 0 до 25 мм.



Рисунок 3.18. Мікрометр DSWQ0-100II

Візуальні спостереження стану оброблюваної поверхні зразків здійснювалися на мікроскопі металографічному Р-1 з 50...507 кратним збільшенням (рис. 3.19). Мікроскоп Р-1 призначає для вивчення структури металів у відбитому світлі й світлому полі при прямому освітлюванні, у темнім полі, у поляризованім світлі.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гранях п'єзоелемента при його механічній деформації. Віброперетворювач складається з підстави, п'єзоелементів, інерційної маси, контактів для зняття електричного потенціалу й втулки. Статичне навантаження на п'єзоелементи здійснюється пружинною гайкою. Верхнє значення робочого діапазону частот: 4000 Гц (ДН-3); 12500 Гц (ДН-4); 500 Гц (ДН-5). Нижнє значення діапазону частот визначається вхідними параметрами вібровимірювальних пристроїв.

3.7 Зразки для досліджень

При виборі матеріалів зразків для експериментальних досліджень урахувалася можливість застосування результатів досліджень для обробки деталей з матеріалів, використовуваних при виготовленні деталей вузлів тертя машин. Також урахувалося збільшення застосування алюмінієвих деталей в автомобілебудуванні.



Рисунок 3.21 - Вібродатчики ДН-3, ДН-4, ДН-5

У зв'язку із цим минулого обрані наступні матеріали: Сталь 40 ДСТУ 1050-88, Д 16, ДСТУ 4784-97, Латунь ЛС 63 ДСТУ 2060-90 . Запропоновані матеріали мають різний хімічний склад і фізико- механічними властивостями. У якості попередньої обробки використовувалася точіння, шліфування. Загальний вид зразків, прийнятих для досліджень представлено на рис. 3.22.

						МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
							79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

3.9 Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження містили в собі:

дослідження механізму АОЗОКПШ;

встановлення впливу режимів АОЗОКПШ на параметри ПШ після обробки.

3.9.1 Методика досліджень шорсткості поверхні

Для виміру шорсткості поверхні застосовувався механічний контактний метод. Параметри шорсткості поверхні визначалися по системі середньої лінії (система М), яка відповідає рекомендаціям ISO і врахована ДСТУ 2413-94 і ДСТУ 2789-73.

Для дослідження використовували плоскі й циліндричні зразки. Вимірювання параметрів і зняття профілограм здійснювалося з кожного зразка по шести крапкам до й після обробки.

Базову довжину в налаштуваннях профілометра вибрали $l=2.5$ мм, стандарт-ISO, фільтр RC. Далі розташовували датчик TR200 на поверхні зразка таким чином, щоб його «проекція» проходила через крапки початку і кінця переміщення пера, позначені різцем. Після цього датчик приводився в рух. Отримані після виміру результати систематизувалися й оброблялися на персональному комп'ютері.

Використовуючи прилад як профілограф, з кожного зразка знімалася профілограма. Вимір параметрів і зняття профілограм здійснювалося для кожного зразка до й після обробки.

Для виміру мікропрофілю використовувався вимірювально-обчислювальний комплекс. Комплекс включає наступні елементи: профілограф-профілометр моделі TR-200, персональний комп'ютер, інтерфейс зв'язку профілограф з комп'ютером, пакет прикладних програм. Профілограф - профілометр реалізує в комплексі тільки функції профілографа. Інтерфейс зв'язку

										Арк.
										81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

профілографа з комп'ютером забезпечує передачу вимірювальних сигналів із профілографа до протоколу RS-232. Пакет прикладних програм повністю забезпечує роботу оператора при вимірюванні й аналізі мікрогеометрії на вимірювальнодослідному комплексі.

Контролювалися параметри мікрогеометрії і форма профілю з використанням кривій Аббота, яка характеризує якість одержуваної поверхні. У перетині проводилося 5 вимірів (рис. 3.23).



Рисунок 3.23 - Зразок для вимірювання шорсткості

Контролювалися параметри шорсткості обробленої поверхні, що виявляють безпосередній вплив на зносостійкість:

R_a – середнє арифметичне відхилення,

S_m , середній крок нерівностей профілю;

R_p , висота найбільшого виступу профілю;

R_v , глибина найбільшої западини профілю;

t_r , відносна опорна довжина профілю.

Крайні значення, що випадають, відкидали, знаходили середні й записували в таблицю.

3.9.2 Методика виміру маслоємності ПШ

Маслоємність поверхні визначали відповідно до ДСТУ 9.302-88 «Єдина система захисту від корозії й старіння. Покриття металеві й неметалеві, неорганічні. Методи контролю». Метод заснований на визначенні кількості масла, адсорбованого ПШ. При вимірюванні застосовують масло з кінематичною в'язкістю $(2,5 - 3,5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при температурі $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Зразок зважували

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

занурювали в масло, нагріте до температури 130 °С, і витримували в ньому до температури (20 ± 5) °С. Потім зразок витягався, віддалявся надлишок масла фільтровальним папером і зважувався.

3.10 Визначення досліджуваних факторів, що впливають на якість ПШ при АОЗОКПШ

Продуктивність процесу АОЗОКПШ залежить від АЧХ коливаний деталі, вихідної шорсткості, виду попередньої обробки, технологічної спадковості, характеристик робочого середовища, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і режимів обробки. На початковому етапі планування експерименту було необхідно скласти матрицю експерименту, що відсіває, і провести експеримент для визначення малозначних факторів. Усі фактори, що впливають на обробку розбиваємо по наступних групах: X – керовані фактори, які впливають на АОЗОКПШ; Z – некеровані; Y – відгук.

Фактори, що виявляють вплив на АОЗОКПШ представлено в таблиці 3.5.

Для виявлення найбільш значимих факторів необхідно провести відсіювальний експеримент на основі плану Плакетта–Бермана. Обраний план являє одним із самих економічних по числу досвідів і ефективним для дисперсійного аналізу. У цьому випадку необхідно буде провести N=12 експериментів для 11 факторів. Тому до 9 існуючих факторів були додано 2 фіктивних фактора. Фактори будуть варіюватися на трьох рівнях +1, 0 і -1.

У таблиці 3.6 представлені рівні кожного фактора.

Таблиця експерименту, що відсіває, за планом типу Плакетта–Бермана представлено в таблиці 3.7.

У результаті розрахунків були відсіяні малозначні фактори. Для проведення експерименту виділено 4 фактора: час обробки, тип кінцентратора, матеріал, склад технологічної рідини.



Рисунок 3.28 - Положення зразка під час проведення експерименту.

Висновки по третьому розділу

Розроблена вібраційна установка для АОЗОКПШ, що дозволяє робити обробку деталей у квазіпружних середовищах у резонансному режимі звукового частотного діапазону коливань у межах від 727 Гц до 8000 Гц.

Розроблений електронний генератор звукових коливань із споживаною потужністю 0,4 кВт.

Розроблена загальна методика експериментальних досліджень АОЗОКПШ, методика вибору технологічних параметрів обробки і методика вимірів параметрів якості оброблюваної поверхні.

Виконаний експеримент, що відсіває, за планом типу Плакетта–Бермана й визначені фактори, вплив яких на процес обробки потрібно досліджувати при проведенні основного експерименту.

Обрані параметри факторів, що впливають на процес обробки і підметів дослідженню.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ АОЗОКПШ НА ГЕОМЕТРИЧНІ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПШ

4.1 Планування експерименту

Експериментальні дослідження присвячені проведенню АОЗОКПШ деталей і визначенню зміни якості ПШ. Ставиться завдання визначити вплив режимів обробки, склад робочого середовища і конструкції концентратора на параметри ПШ, що визначають термін служби деталей.

Головною метою експериментальних досліджень було визначення раціональних режимів обробки. У попередній главі були визначені фактори, що впливають на процес обробки: час обробки, вихідні значення параметрів шорсткості ПШ, форма і розміри концентратора, характеристика технологічної рідини, форма і матеріал деталі. Під час проведення експеримента ми можемо управляти тільки часом обробки. Форма і розміри концентратора визначаються виходячи з матеріалу та форми деталі. Рівні варіювання факторів представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Рівні факторів

Найменування позначення факторів	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	+1	
Час обробки x1, хв	5	10	15	5
Склад технологічної рідини – X2	№1	№2	№3	

Матриця планування повного двухфакторного експерименту представлена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Матриця планування експерименту 32

Номер досліду	X1	X 2
1	+	+
2	+	0
3	+	-
4	-	+
5	-	0
6	-	-
7	0	+
8	0	0
9	0	-

4.2 Дослідження АЧХ власних коливань і змушених коливань деталі в резонансному режимі

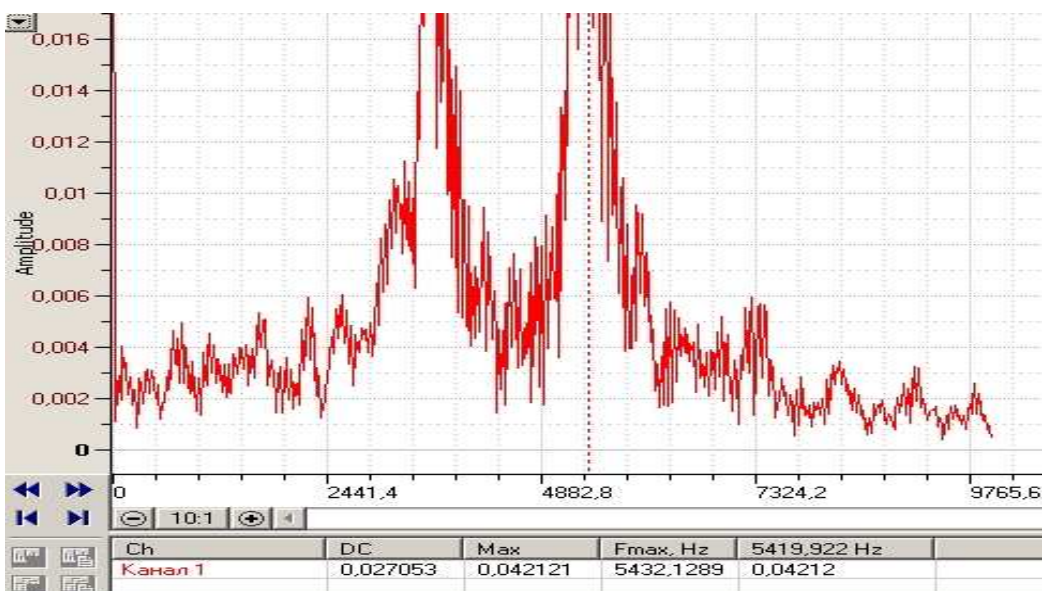
В умовах резонансу амплітуда змушених коливань різко збільшується. При цьому ззовні затрачається мінімум енергії на підтримку резонансу, а усередину системи надходить максимум підводимої енергії. Для перевірки змушених резонансних коливань знімалися АЧХ власних (ВК) і змушених (ЗК) коливань деталі, при частоті імпульсів генератора вступників на ЗКС від 0,5 до 8 кГц, із кроком 0,5 кГц. У якості зразка використовувалася деталь циліндричної форми, матеріал - Ст 45. Випробування проводилися для двох концентраторів ЗКС різної форми, циліндрично- профільованого (№1) і конусного (№2).

Вид АЧХ деталі при змушених і власних коливаннях представлено на рис. 4.1. Збіг частоти ВК із частотою ЗК системи підтверджує роботу в резонансному режимі.

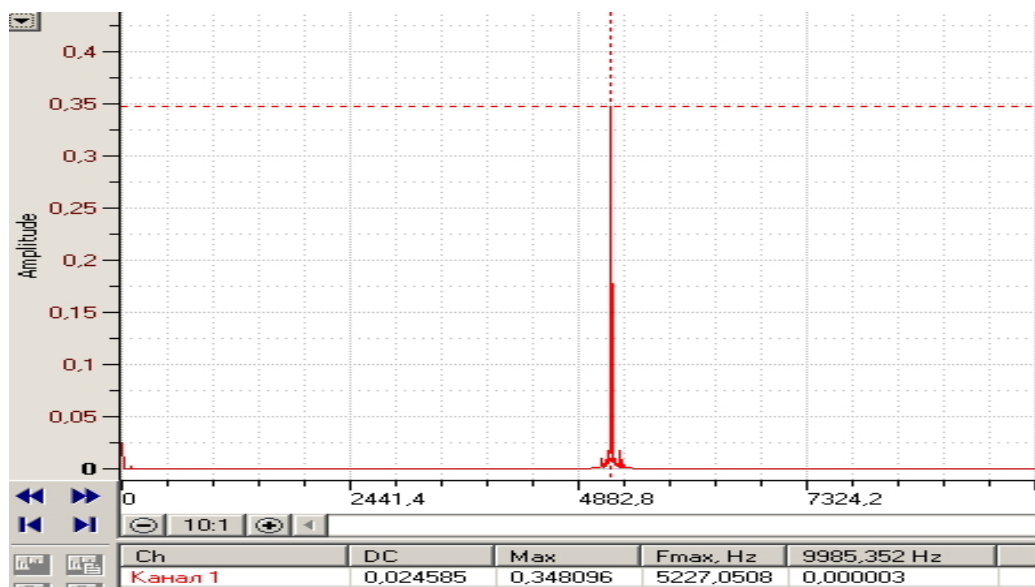
Результати вимірювань частоти та амплітуди змушених і власних коливань зразків з різних матеріалів, при закріпленні на різних концентраторах

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

представлені в представлені далі.



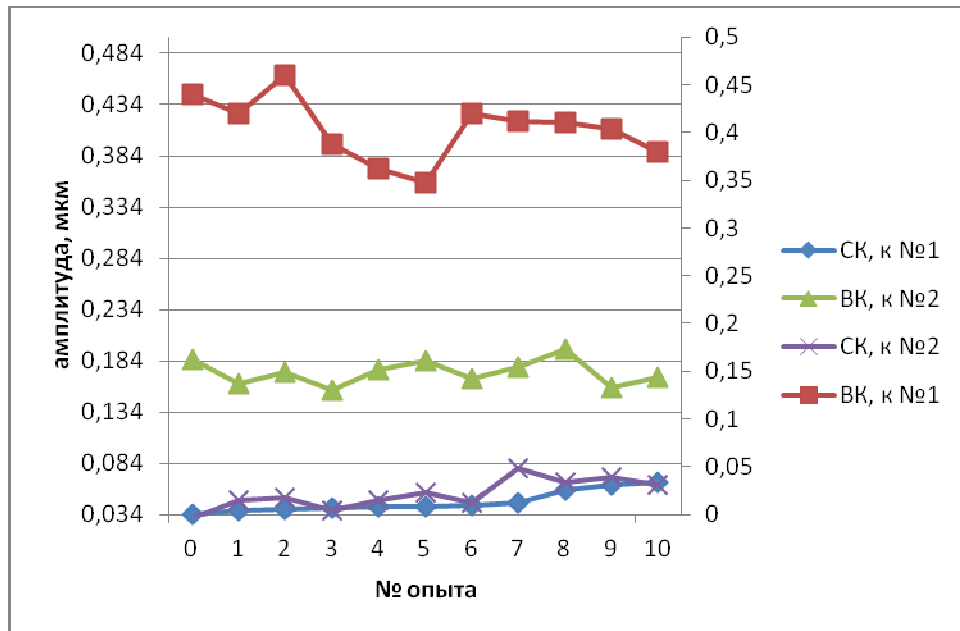
а)



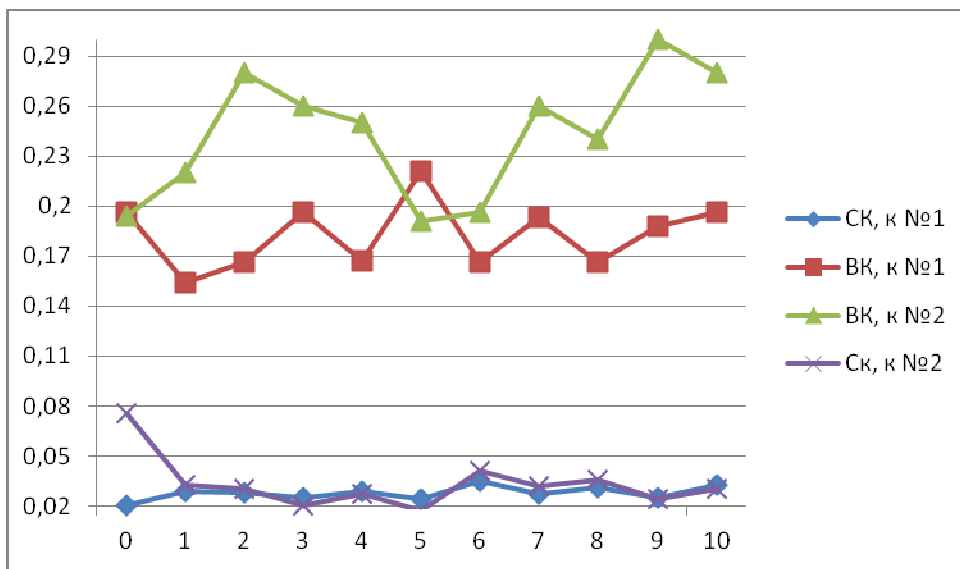
б)

Рисунок 4.1 - АЧХ деталі: а) ЗК; б) ВК.

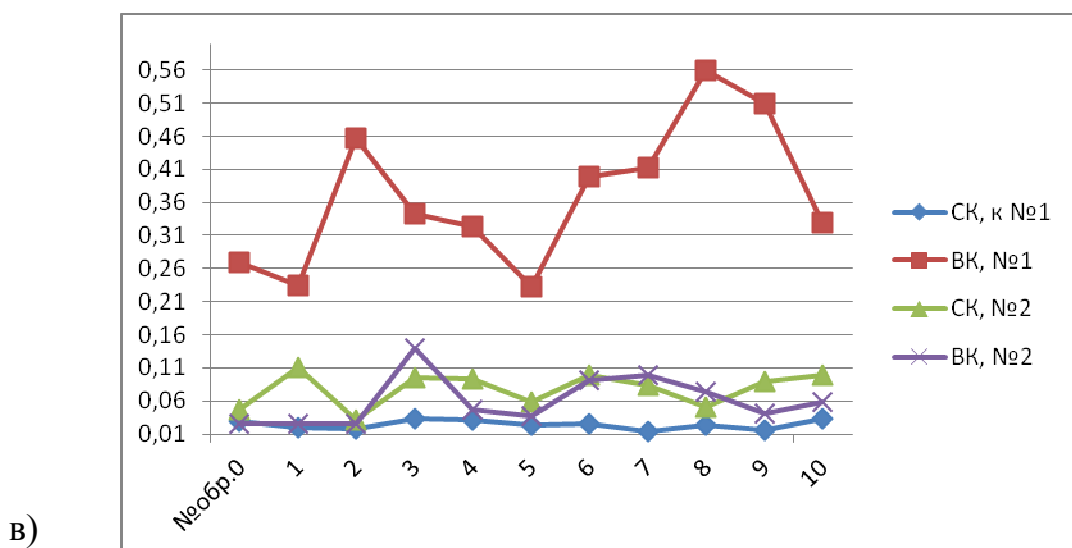
АЧХ ЗК і ВК деталей, з різних матеріалів, при закріпленні на концентраторах №1 і №2 представлено на рис. 4.2 і 4.3 відповідно.



а)



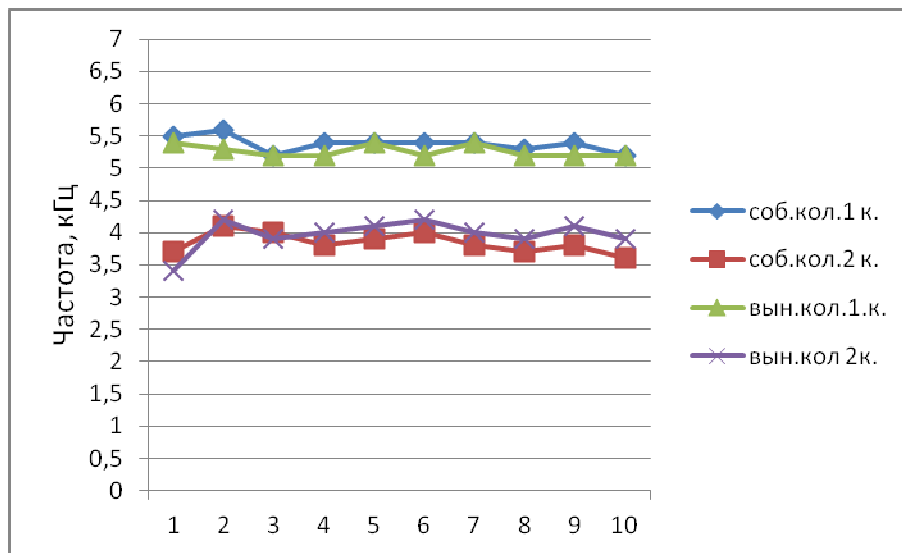
б)



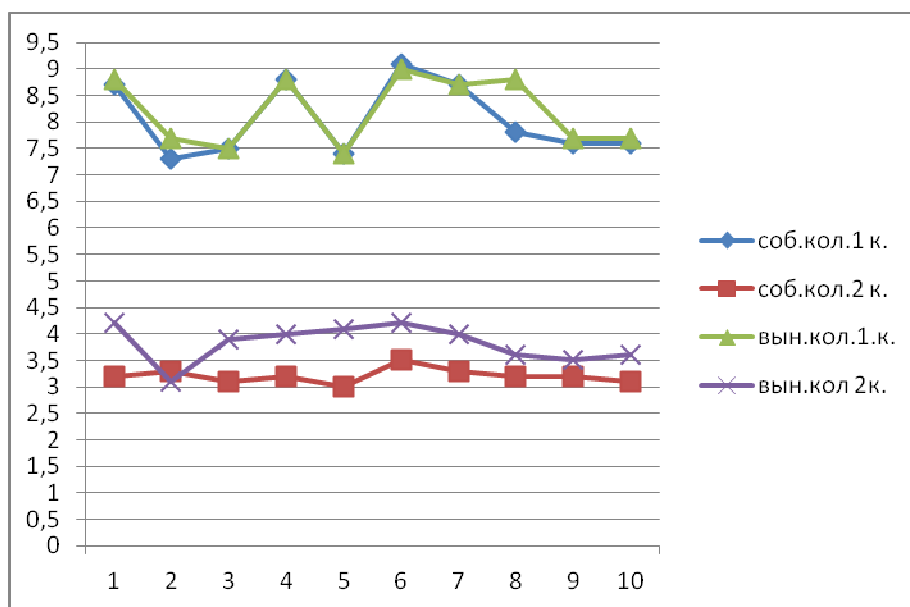
в)

Рисунок 4.2 - Амплітуда коливань деталей: а) з Д16; б) із ЛС63; в) зі Ст40.

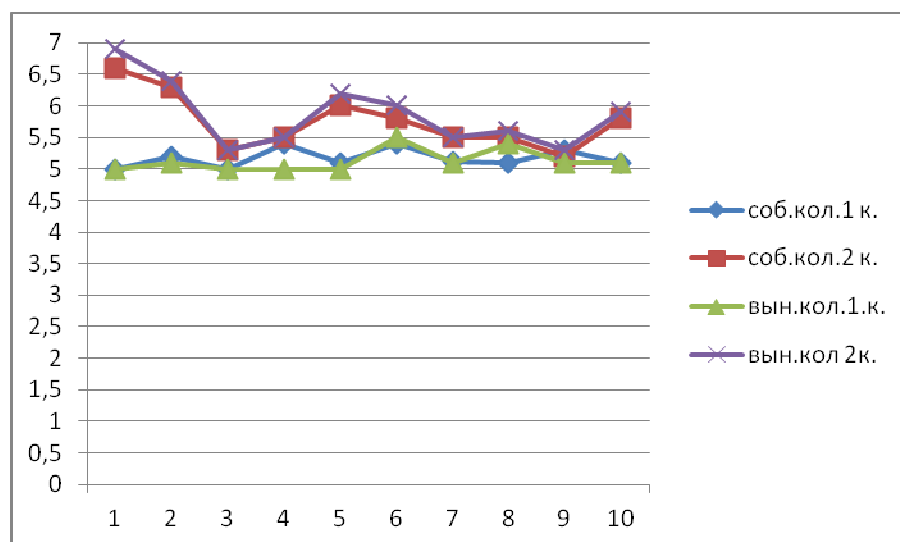
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 - Частота колебаний деталей: а) з Д16; б) із ЛС63; в) зі Ст40.

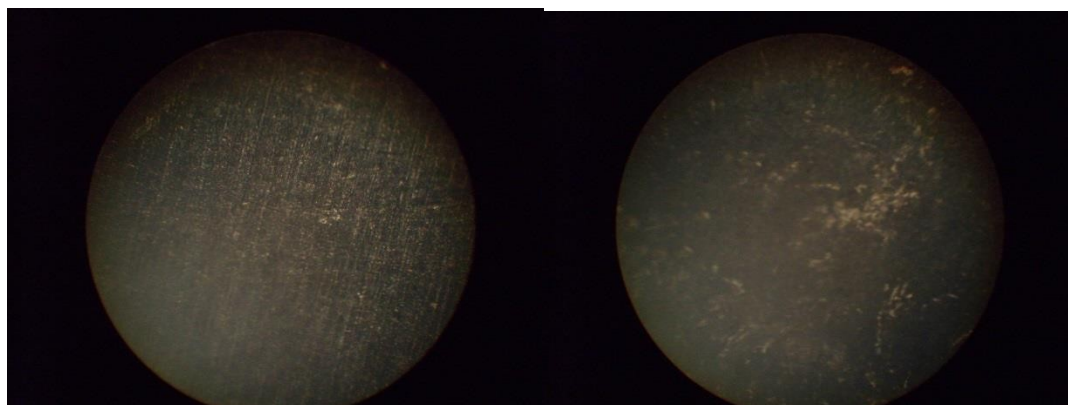
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Виходячи з результатів експерименту, по визначенню впливу конструкції концентратора на амплітудно-частотні характеристики процесу, можна зробити наступні висновки: найбільша амплітуда змушених коливань наблюдається при резонансі; амплітуда залежить від форми концентратора і форми та матеріала зразка; амплітуди власних коливань (ЗК) деталі на різних концентраторах збігаються, а змушені коливання (ВК) різні. Експериментально підтверджена правильність математичного забезпечення розрахунку геометричних параметрів концентратора.

4.3 Топографія ПШ

Топографія поверхонь зразків, виготовлених зі Ст 45, до та після випробування, вивчалася на металографічному мікроскопі.

Резонансна віброобработка у квазіпружної середовищу дозволяє одержати топографію оброблюваної поверхні близьку до раціональної (експлуатаційною). Одержуваний рельєф ПШ забезпечує: високу фактичну площу контакту; мінімальне питоме навантаження на поверхню, внаслідок збільшується опорна довжину профілю; раціональну маслоємність поверхні, за рахунок великої кількості мікрозападин із плавними краями; і відповідно високу зносостійкість деталей. Знімки топографії поверхні до і після обробки представлено на рис. 4.4-4.9.

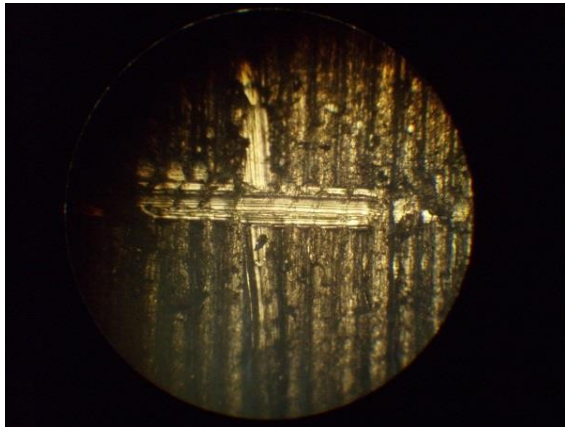


а)

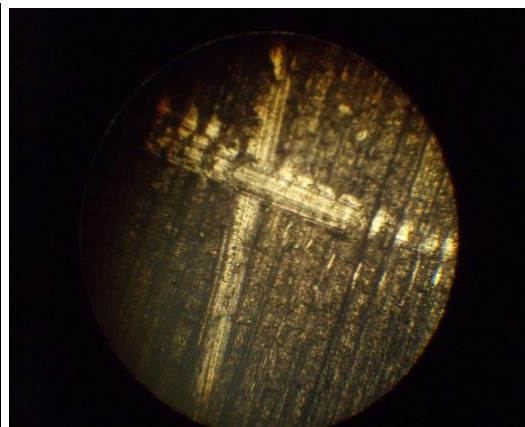
б)

Рисунок 4.4 - Топографія цементованої поверхні, Ст 40Х (1:500)

										Арк.
										94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2116125. 000 ПЗ					



а)



б)

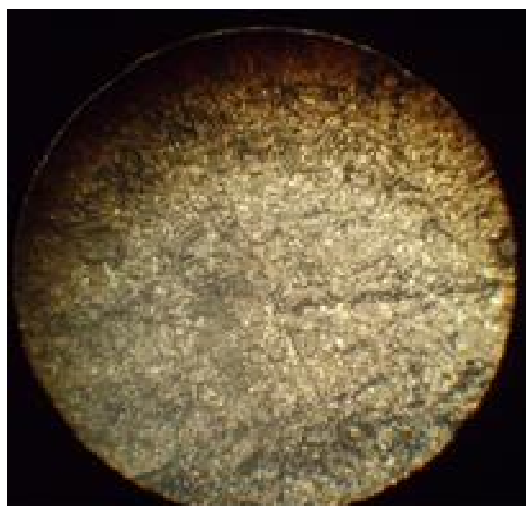
Рисунок 4.5 - Топографія поверхні Ст 45 після гостріння (1:500)



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.6 - Топографія поверхні Д16 (1:500): а) до обробки; б) 5 хвилин

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки; в) 10 хвилин обробки; г) 15 хвилин обробки.

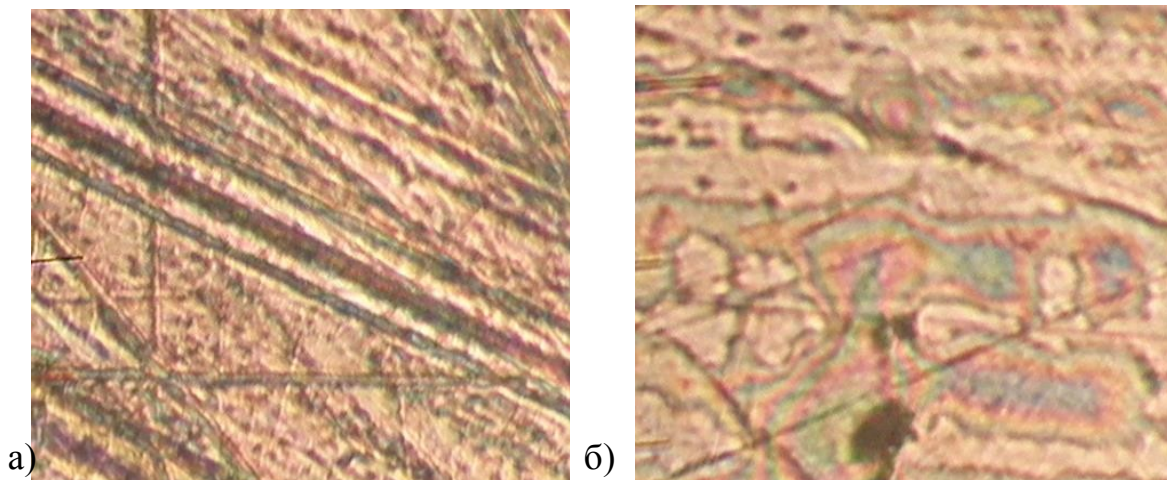


Рисунок 4.7 - Топографія поверхні пластини після полірування: а) вихідна; б) після обробки, $t=10$ хв.

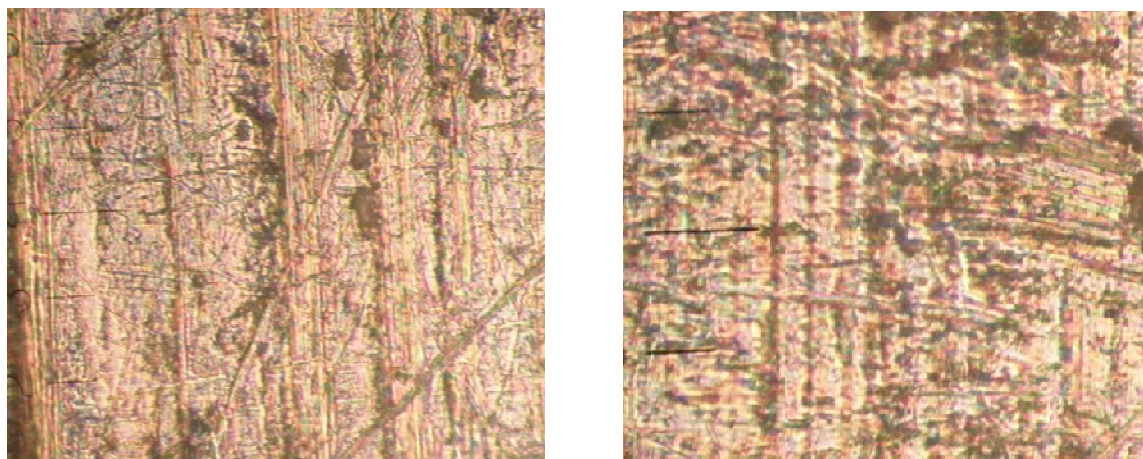


Рисунок 4.8 -Топографія поверхні пластини холодний прокат: а) вихідна; б) після обробки, $t=10$ хв.



Рисунок 4.9 - Топографія поверхні пластини Ст 40 після обробки: а) у маслі

I40; б) у маслі I40+порошок.

Оброблені деталі (полірування +АОЗОКПШ) мають поверхню із зеркальним блиском без слідів попередньої операції, подряпин, проплавів, ділянок і інших дефектів.

При цьому спостерігається утворення робочих поверхонь із субмікрорельєфом, що заліковують дефектні зони.

4.4 Мікротвердість

Метою досліджень був вплив АОЗОКПШ на мікротвердість ПШ. При цьому використовувався мікроструктурний метод досліджень.

Таблиця 4.3 - Мікротвердість для і після обробки на резонансній частоті 3800 Гц, HRB

№	Вид середовища	Час обробки на резонансній частоті, хв			
		0	5	10	15
1	Масило I40	74	78	82,5	86
2	Вода	74	76	79.5	82
3	Вода з ПАВ	74	78.25	82	81

Після обробки пластин в індустріальному маслі, були помічені ПШ пластин. Твердість ПШ збільшилася від 72...76 НВ до 81...86 НВ.

4.5. Дослідження мікротвердості зразка пластини 150x30x2 мм, Сталь 40, резонанс $f=2500$ Гц

За отриманим даними побудовані графічні залежності твердості поверхонь від часу обробки (Рисунок 4.10- 4.15).

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянувши і зрівнявши отримані графічні залежності, можна зробити наступні висновки:

найбільший ефект спостерігається при обробці в резонансній частоті, і протягом 10 хвилин, хоча не виключене, що при збільшенні часу значення твердості буде продовжувати зростати або навпаки зменшуватися, але менш стрімко;

збільшення обсягу робітничого середовища позитивно впливає на твердість робочій поверхні, у той час як на показники шорсткості такий вплив має зменшення обсягу. То, для досягнення раціональних показників твердості і якості поверхні необхідно знайти оптимальне значення обсягу;

найбільше збільшення твердості відбувається в резонансному режимі.

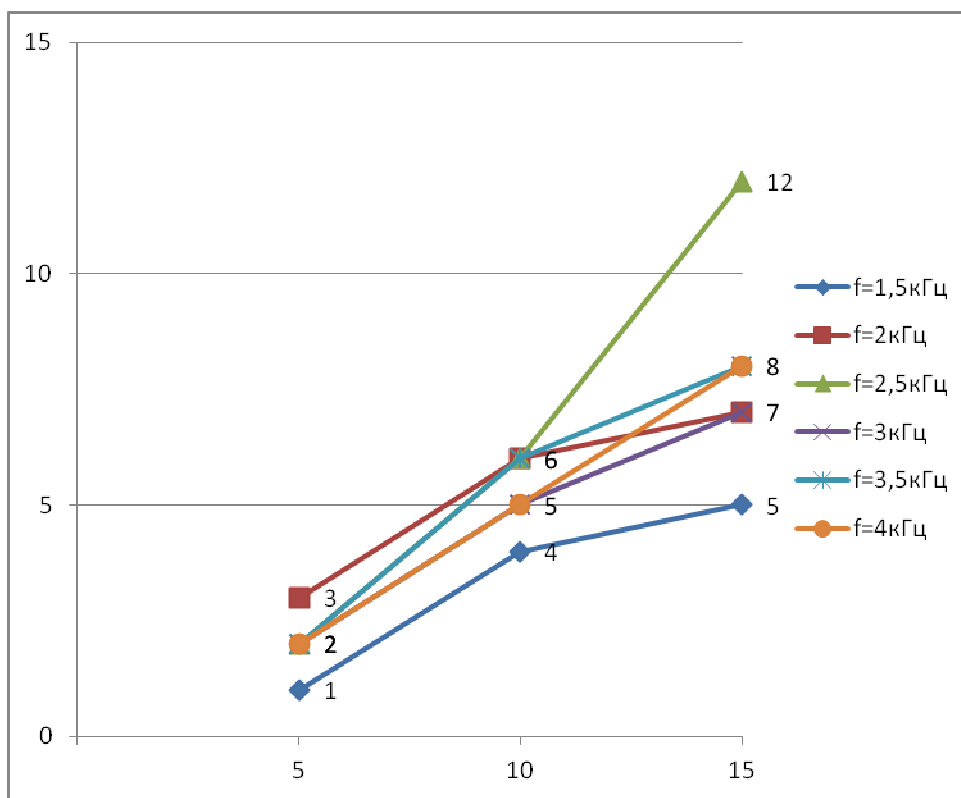


Рисунок 4.13 - Залежності збільшення твердості поверхні від часу обробки в робітничім середовищі масло I-40

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для аналізу експериментальних досліджень, розглянемо вплив часу ні обробки й частоти коливань на якість ПШ (Рис. 4.16-4.19).

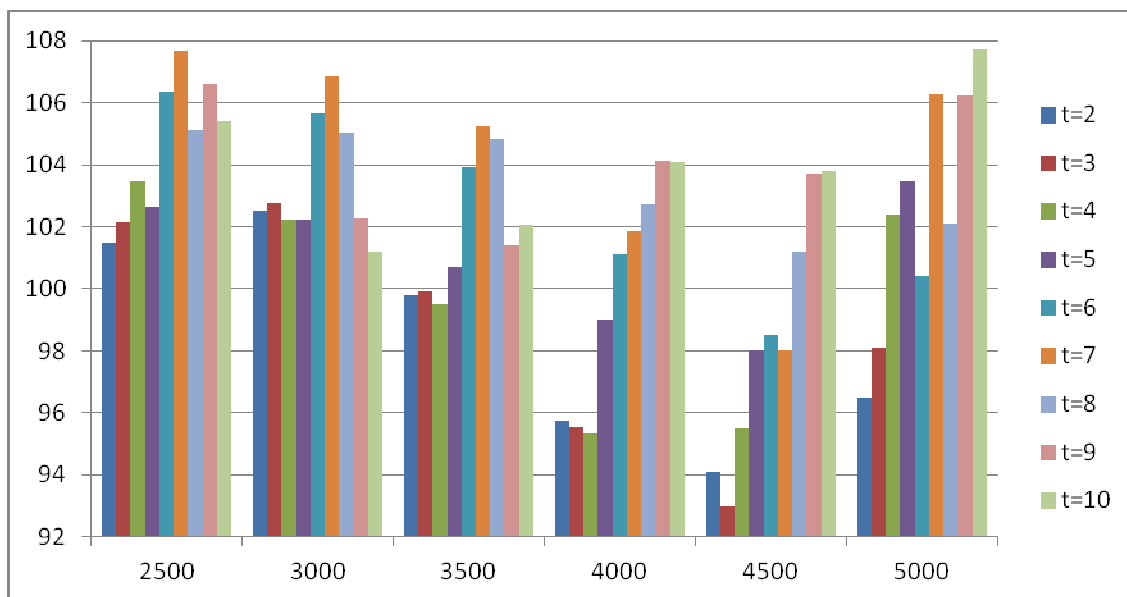


Рисунок 4.16 - Залежність твердості зразків від частоти звукових коливань при обробці пружного середовища I-40

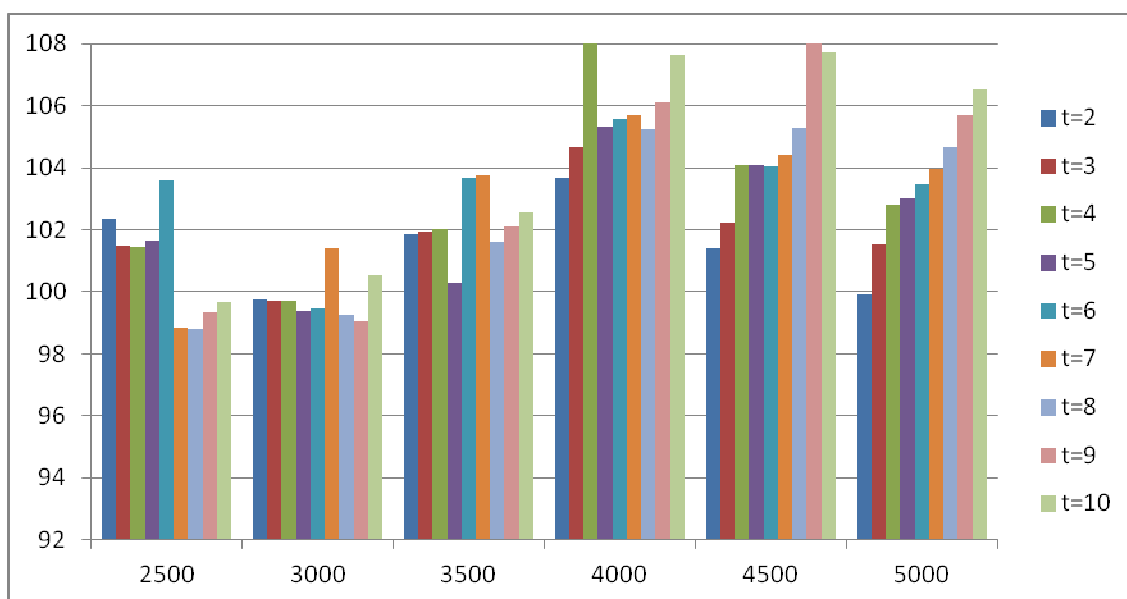


Рисунок 4.17 - Залежність твердості зразків від частоти звукових коливань при обробці в маслі I-40 + порошок

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРТАМ 2116125. 000 ПЗ

Арк.

101

За результатами експерименту можна зробити наступні висновки:

АЧХ ЗКС при різних концентраторах різні;

АЧХ при різних значеннях імпульсів генератора збігаються по частотним значенням піків, але відрізняються за значеннями амплітуди на піках.

4.8 Аналіз профілограм і опорної кривій оброблюваної поверхні

Про, що відбуваються на рівні мікронерівностей змінах свідчать опорні криві, отримані в результаті обробки профілограм, знятих з поверхні зразків до і після обробки.

Аналізуючи графіки та профілограми можна зробити висновок, що найбільш ефективний час обробки 8-12 хвилин. Аналіз результатів показав, що після 10 хвилин вершини загострюються, а западини стискаються. Спочатку відбувається зміцнення по гострих піках. Зменшується висота піка і його опорний майданчик, а западина зменшується. Потім проходить закруглення піків. Потім відбувається розміцнення й відбувається зворотня реакція. Тому що зменшуються піки та западини і відповідно збільшується, от же, відбувається ППД.

4.9 Дослідження впливу АОЗОКПШ на маслоємкість і площа фактичного контакту оброблюваної поверхні

Маслоємкість поверхні являє собою здатність поверхні втримувати в мікрозападинах рідина для того, щоб при тиску на неї ця рідина не випливала за межі лунки. Підвищена маслоємкість сприяє створенню шару «змащення», що забезпечує рідинне тертя, і, як наслідок, охороняє поверхню від зношування.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

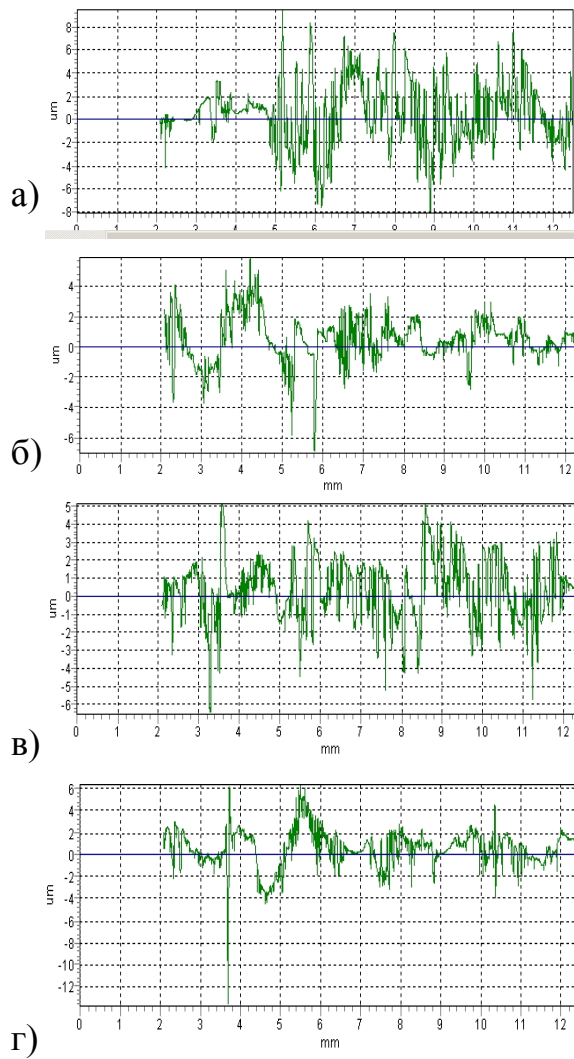


Рисунок 4.31 - Зміна мікропрофілю до та після обробки : а-вихідна, б-5хвилин, в-10 хвилин, г-15 хвилин.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРТАМ 2116125. 000 ПЗ

Арк.

105

режимів обробки.

Амплітуда ВК залежить від форми концентратора, форми і матеріалу зразка.

При АОЗОКПШ спостерігається утворення робочих поверхонь із субмікрорельєфом, що заліковують дефектні зони.

Найбільший ефект спостерігається при обробці в резонансній частоті й протягом 10 хвилин.

Збільшення обсягу робочого середовища позитивно впливає на твердість робочих поверхні, у той час як на показники шорсткості такий вплив має зменшення обсягу.

У результаті АОЗОКПШ змінюється мікрорельєф поверхні виробу, створюється безліч незв'язаних між собою западин, які є маслоємними резервуарами.

У результаті теоретичних досліджень отримані формули для знаходження основних параметрів АОЗОКПШ на основі коефіцієнтів перекриття і оброблювальності й визначені області значень цих коефіцієнтів, дозволяючих призначати режими обробки, що забезпечують раціональні значення параметрів ПШ.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Перспективи застосування АОЗОКПШ

При виконанні роботи вивчена технологія акустиченого ОЗО у квазіпружних середовищах. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що застосування АОЗОКПШ має ряд переваг і дозволяє рекомендувати її для використання в практичних цілях.

Отримані в попередньому розділі результати досліджень досить переконливо продемонстрували широкі можливості АОЗОКПШ при формуванні якості поверхні деталей. Як уже було показано раніше, віброобробка забезпечує досягнення певних ефектів із цілого ряду показників. Однак, для кожного з таких якісних критеріїв оптимальні режими віброобробки можуть суттєво відрізнятися, що відповідно визначає необхідність проведення попереднього системного аналізу, що включає в себе визначення взаємозв'язку між принципами вибору режимів обробки на базі розглянутих механізмів впливу вібрації. Загальна схема такого аналізу, сформульована на базі виконаних у роботі досліджень і розроблених моделей впливу режимів АОЗОКПШ на якість поверхні, наведено в таблиці 5.1.

5.2 Економічний ефект від застосування АОЗОКПШ

Методи ОЗО дозволяють досягнути ресурсозбереження при виготовленні деталей. Економічний ефект від застосування АОЗОКПШ обумовлений наступним:

Підвищення довговічності деталей оброблених АОЗОКПШ внаслідку збільшення зносостійкості яке веде до зниження енерговитрат і продовженню терміну служби деталей.

Продовження міжремонтних строків роботи машин за рахунок підвищення

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зменшення кількості використовуваних деталей протягом усього терміну служби машини призводить до зменшення використання матеріалів на виготовленні запасних частин.

Висновки по п'ятому розділу

Технічний ефект полягає в розробці методу поліпшення експлуатаційних властивостей деталей пара тертя машин і розробці технічної установки на рівні винаходу.

Економічний ефект досягається за рахунок зниження собівартості ОЗО, зниження енергоємності виготовлення деталей і підвищення довговічності відповідальних деталей.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						114
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

концентраторів, склад технологічного середовища. Виявлене, що проведення АЗОКПШ деталі дозволяє підвищити мікро- твердість поверхневого шару для зразка зі Ст. 40 –на 7-10%; зменшити R a на 10-15%, збільшити Sm на 5-7%.

6. Розроблені регресійні рівняння, що розкривають залежність параметрів ПШ від їхнього вихідного значення і часу обробки.

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
						116
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аршанский, М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М.М. Аршанский, В.П. Щербаков. – М.: Машино-строение, 1988. - 136 с.
2. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов /А.К. Байкалов. Киев: Наук. думка, 1978. – 270 с.
3. Технология производства авиационных двигателей ч. 1. Основы технологии / В. А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2005. – 518 с.
4. Бутенко, В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В.И.Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
5. Васильев, А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко С.А. [и др.] – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
6. Войтов, В. А. Универсальная машина трения / В. А. Войтов, В. А. Баздеркин// Трение и износ. –1992. – Т. 13. – № 3. – С. 501-506.
7. Гуров, Р.В. Взаимосвязь режимов обработки и геометрических параметров инструмента с параметрами качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД / Р.В.Гуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №8. – С. 88-94.
8. Гуров, Р.В. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин с учетом их функционального назначения: дис. ...д-р. техн. наук: 05.02.08 / Гуров Роман Владимирович; Брянский гос. техн. ун-т. –Брянск, 2012. – 302 с.
9. Денисов, П.Д. Регулируемые вибровозбудители / П.Д. Денисов, П.С. Берник// Вибрации в технике и технологиях. – 1996. – №1(3) – С.41-47.
- 10.К вопросу изменения микротвердости материала при вибрационной

					<i>МРТАМ 2116125. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>117</i>

ДОДАТКИ

					МРТАМ 2116125. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		123