

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

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Технологічне удосконалення сервісного обслуговування
насосів за рахунок алмазного накочування валів»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_22.02.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною освітньо-
науковою програмою
«Сервісна інженерія в агро-
промисловому виробництві»
спеціальностей 133 «Галузеве
машинобудування», 208 «Агроінженерія»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд(ОНП)_22
БУРДА Данило

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПОВ Станіслав

Полтава – 2026 року

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

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

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

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БУРДА Данило

1. Тема роботи: *«Технологічне удосконалення сервісного обслуговування насосів за рахунок алмазного накочування валів»*,
керівник роботи **канд. техн. наук, доцент ПОПОВ Станіслав**,
затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

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

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

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

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Методика досліджень.

Розділ 3. Результати експериментів.

Розділ 4. Практична реалізація розробок.

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач вищої освіти _____ Данило БУРДА
(підпис)

Керівник роботи _____ Станіслав ПОПОВ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тлумачальна записка: 4 розділи, 15 рисунків, 3 таблиці, 40 використаних джерел, 61 сторінка. **Ілюстраційна частина:** 10 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес формування залишкових напружень у довгомірних валах зі сталі 40X після поверхневого пластичного деформування методом алмазного наочування.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів алмазного наочування на рівень, розподіл і характер залишкових напружень у поверхневому шарі валів, а також якість обробки.

Постановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – дослідження процесу формування та розподілу залишкових напружень у довгомірних валах зі сталі 40X після обробки методом алмазного наочування із метою підвищення їх жорсткості, стабільності форми та експлуатаційної надійності.

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

У **першому розділі** проведено огляд літературних джерел за проблематикою, пов'язаною із підвищенням якості обробки довгомірних валів із застосуванням методу поверхневого пластичного деформування.

У **другому розділі** запропоновано методику дослідження процесу алмазного наочування.

У **третьому розділі** подає результати експериментів, у яких визначено вплив параметрів алмазного наочування на якість поверхневого шару та залишкові напруження у валах.

Четвертий розділ присвячений практичному впровадженню результатів досліджень, оцінці економічної ефективності, безпеки та екологічності розробленої технології.

Практичні результати роботи – розроблення рекомендації щодо оптимізації режимів та розширення технологічних можливостей обробки, запропоновано методики контролю залишкових напружень, отримано економічний ефект, встановлено екологічні переваги, а також розроблено заходи безпеки.

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

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

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

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання технологічного удосконалення сервісного обслуговування насосів за рахунок підвищення якості та довговічності валів методом алмазного накочування. Проаналізовано вплив залишкових напружень на точність, жорсткість і експлуатаційні властивості довгомірних деталей. Розроблено методику дослідження процесу алмазного накочування та визначення осьових, радіальних і тангенціальних залишкових напружень у зразках зі сталі 40Х. Проведено експериментальні дослідження, які показали, що оптимальні параметри обробки забезпечують підвищення мікротвердості, зниження шорсткості й формування сприятливих стискаючих напружень. Визначено економічний ефект від упровадження технології, що сприяє зменшенню трудомісткості обробки й підвищенню надійності насосного обладнання.

АЛМАЗНЕ НАКОЧУВАННЯ, ПОВЕРХНЕВЕ ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ, ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ, СТАЛЬ 40Х, ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБРОБКИ, ЖОРСТКІСТЬ ВАЛІВ, ЗМІЦЕННЯ ПОВЕРХНІ

ANNOTATION

In the qualification work focuses on technological improvement of pump maintenance by enhancing the quality and durability of shafts through diamond burnishing. The influence of residual stresses on the accuracy, stiffness, and performance of long shafts is analyzed. A research methodology for diamond burnishing and determination of axial, radial, and tangential residual stresses in 40X steel samples has been developed. Experimental studies showed that optimal processing parameters increase microhardness, reduce surface roughness, and form beneficial compressive stresses. The economic efficiency of the technology was evaluated, confirming its potential to reduce processing labor intensity and improve the reliability of pump equipment.

DIAMOND BURNISHING, SURFACE PLASTIC DEFORMATION, RESIDUAL STRESSES, 40X STEEL, SURFACE LAYER, TECHNOLOGICAL PROCESSING PARAMETERS, SHAFT STIFFNESS, SURFACE HARDENING

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Застосування довгомірних валів, виготовлення	8
1.2 Залишкові напруження, їх вплив на якість	10
1.3 Визначення залишкових напружень для валів	13
1.4 Вплив поверхнево-пластичного деформування на якість виробів	16
1.5 Внутрішнє тертя та його вплив на експлуатаційні показники	20
1.6 Методи впливу на згинальну жорсткість	23
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1 Інструмент для обробки нежорстких валів	28
2.2 Методика проведення експерименту	29
2.3 Визначення осьових залишкових напружень	31
2.4 Визначення радіальних залишкових напружень	34
2.5 Визначення тангенціальних залишкових напружень	36
2.6 Вимірювання деформацій та контроль напружень	38
Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	41
Вплив параметрів обробки на показники якості	41
Висновки до розділу 3	46
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	48
4.1 Безпека ведення операції алмазного накочування	48
4.2 Розрахунок економічного ефекту	49
4.3 Екологічна безпека	56
Висновки до розділу 4	58
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	62

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні зростають вимоги до надійності, точності та довговічності деталей, зокрема довгомірних валів. Вони використовуються у різноманітних механізмах – від насосного обладнання до транспортних систем. Одним із чинників роботоздатності таких деталей є наявність залишкових напружень у матеріалі. Вони формуються під час механічної або термічної обробки. Нерівномірний розподіл залишкових напружень часто призводить до викривлення деталей, зниження точності форми та зменшення експлуатаційних характеристик. З іншого боку, контрольоване формування сприятливих напружень стиску у поверхневих шарах може суттєво підвищити втомну міцність, корозійну стійкість та зносостійкість виробів.

Одним із ефективних способів керування властивостями поверхневого шару та формування залишкових напружень є алмазне накочування. Це один із методів поверхневого пластичного деформування. Він забезпечує високих клас чистоти обробки та підвищення мікротвердості без суттєвого видалення матеріалу. Саме тому дослідження закономірностей формування залишкових напружень при алмазному накочуванні маложорстких валів є актуальною науково-практичною задачею, що має велике значення для вдосконалення технологій зміннення деталей машин.

Метою роботи є дослідження процесу формування та розподілу залишкових напружень у довгомірних валах зі сталі 40Х після обробки методом алмазного накочування із метою підвищення їх жорсткості, стабільності форми та експлуатаційної надійності.

Об'єктом дослідження є процес формування залишкових напружень у довгомірних валах зі сталі 40Х після поверхневого пластичного деформування методом алмазного накочування, а **предметом** – закономірності впливу параметрів алмазного накочування на рівень, розподіл і характер залишкових напружень у поверхневому шарі валів, а також якість обробки.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань:

- 1) проаналізувати існуючі методи визначення залишкових напружень у деталях типу валів та оцінити їх вплив на якість поверхневого шару;
- 2) розглянути принципи та переваги методи алмазного накочування як способу поверхневого пластичного деформування;
- 3) запропонувати методику експериментального визначення залишкових напружень у валах після алмазного накочування;
- 4) провести експериментальні дослідження осьових, радіальних та тангенціальних залишкових напружень у зразках зі сталі 40X;
- 5) виконати аналіз отриманих результатів та визначити вплив технологічних параметрів обробки (зусилля притискання, швидкість, кількість проходів) на рівень залишкових напружень;
- 6) надати рекомендації щодо оптимізації режимів алмазного накочування для забезпечення підвищеної жорсткості та стабільності довгомірних валів;
- 7) оцінити безпеку проведення операції поверхневого пластичного деформування, економічної ефективності та екологічності технологічного процесу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Застосування довгомірних валів, виготовлення

Вал – це деталь, що обертається навколо власної осі, призначена для передачі руху зв'язаним з нею частинам машини чи механізму, складовою яких вона є [1-10]. При цьому вал передає крутний момент та забезпечує підтримання обертових деталей машин, що на ньому розміщені (рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Довгомірний вал

Довгомірні вали широко використовуються у насосах, що призначені для транспортування різноманітних рідких середовищ, позначене функціонування агропромислового комплексу без яких неможливе. У більшості випадків такі деталі працюють за умов дії змінних навантажень і зазнають малих пружних деформацій згину та кручення.

Обробка валів за трудомісткістю складає більш, ніж 40% від загальної на виготовлення виробів, тому питання підвищення ефективності обробки валів особливо є актуальними. Обробки таких деталей, як вали та осі великої довжини пов'язана з їх недостатньою жорсткістю, внаслідок чого при обробці виникають значні деформації.

На точність та якість обробки впливає чимало факторів (рисунок 1.2, 1.3): похибка встановлення, недостатня жорсткість верстату та інші фактори, що

впливають на якість виготовлення, а також і специфічні, притаманні довгомірним деталям (недостатня жорсткість деталі, шорсткість оброблюваної поверхні, точність розмірів). При розробці залі потрібно виключити або мінімізувати вплив цих факторів.

Рисунок 1.3 – Основні фактори якості обробки

Аналіз методів налагодження верстатів для виготовлення довгомірних деталей показав, що основна проблема полягає у забезпеченні співвісності осі заготовки

деталі та осі встановлювальних елементів верстату. Вісь довгої деталі не являється ідеальною прямою. Тому при наладці, як правило, використовують еталон, довжина якого співрозмірна із довжиною деталі. При фрезерно-центрувальній операції відхилення від прямолінійності еталону призводить до того, що вісь установочних призм не буде співпадати з віссю інструмента.

Те ж саме спостерігається і при наладці токарних та інших верстатів. Більш ретельне рихтування та шліфування еталону призводить до додаткових затрат. Крім того даний еталон не можна використати при обробці інших деталей.

При виготовленні та в процесі експлуатації довгомірних валів можлива поява викривлення їх повздожньої осі, внаслідок чого з'являється необхідність в правці. Даний процес є складним та вимагає висококваліфікованого персоналу або відпрацьованої технології правки.

1.2 Залишкові напруження, їх вплив на якість

Основною проблемою при виготовленні маложорстких довгомірних валів, є наявність у матеріалі деталі значного рівня і нерівномірного розподілу залишкових напружень, поява яких у значній мірі обумовлена технологічними причинами [11-15]. У результаті релаксації даних напружень відбувається викривлення виробів, причому процес релаксації нерідко значно розтягнутий у часі, а це може призводити до викривлення вже готового виробу. Залишкові напруження виникають практично при всіх технологічних процесах термічної, механічної і багатьох інших видах обробки.

Залишковим напруженням передують пружна деформація та напруження, врівноважені всередині тіла при відсутності зовнішніх впливів (силових і температурних). На відміну від тимчасових напружень (внутрішні), залишкові напруження зберігаються в часі.

Залежно від ступеня локальності розрізняють: залишкові напруження 1-го роду (макроскопічні), врівноважені в межах одного порядку з розмірами всього тіла; залишкові напруження 2-го роду (мікроскопічні), урівноважуючі в обсягах одного порядку з розмірами зерен; залишкові напруження 3-го роду (субмікроскопічні

спотворення), урівноважуючі в обсягах одного порядку з розмірами атомно-кристалічної решітки [16-20].

Основною причиною виникнення залишкових напружень є неоднорідність деформованого стану з огляду на різноманітну зміну довжини (об'єму) в різних зонах тіла. Причиною появи цієї неоднорідності може бути: температурний градієнт, наприклад, при різкому нагріванні або охолодженні (термічні або температурні напруження); неоднорідність теплового розширення різних структурних або конструктивних складових тіла (гетерогенні структури, біметали і ін.); фазові перетворення (фазові напруження); неоднорідність пластичної деформації (залишкові напруження після поверхневого наклепу).

Дослідженнями вітчизняних і зарубіжних вчених було доведено великий вплив залишкових напружень на умови експлуатації і термін служби деталей: зносостійкості, корозійної стійкості, руйнування, статичної міцності, циклічної міцності, стабільності форми деталей, ударних навантажень. Зазвичай наявність в деталях залишкових напружень вважають негативним фактором, але в деяких випадках вони можуть бути корисними (підвищують межу пружності системи, витривалості, корозійно-механічної, корозійної стійкості тощо) [21-25].

Залишкові напруження стиску істотно підвищують несучу здатність деталей, що працюють при змінних навантаженнях. Стискаючі напруження у поверхневих шарах металовиробів можуть повністю звести до нуля негативний вплив виточок, отворів, виступів, тріщин, дефектів та інших концентраторів напружень. Також залишкові напруження розглядаються як резерв міцності в машинобудуванні.

Головною причиною підвищення втомної міцності є залишкові напруження стиску. У деяких випадках потрібно підвищити твердість поверхні на локальній ділянці деталі. Експериментально встановлено, якщо, наприклад, застосувати загартування струмами високої частоти, то втомна міцність в зонах обриву загартованого шару знижується на 33%. Пояснюється це несприятливою дією залишкових напружень розтягу. Можна також навести приклади ефективного використання залишкових напружень у боротьбі з корозійним розтріскуванням і в підвищенні зносостійкості поверхонь тертя при їх недостатньому змащенні.

Зазвичай наамисно створені напруження сприяють зміцненню виробів. Однак внутрішні напруження можуть бути використані не тільки для зміцнення матеріалів, але і для спрямованого знеміцнення, забезпечення необхідного характеру руйнування. Як приклад можна привести термічне різання скла за допомогою внутрішнього напруження і розколонування кристалів синтетичного корунду.

Приклади, наведені вище, показують позитивну роль залишкових напружень, але на практиці вони, на жаль, частіше у негативних прикладах. Так, незважаючи на суперечливі думки, багато дослідників вважають, що залишкові напруги розтягу в поверхневих шарах знижують зносостійкість деталей машин.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що залишкові напруження впливають на процес корозії: стискаючі напруження знижують інтенсивність процесу корозії, напруження розтягу збільшують електрехімічне розчинення металу. Напруження розтягу в поверхневих шарах можуть викликати навіть корозійне руйнування металу. Латунні вироби під дією внутрішніх напружень розтягу можуть мимовільно розтріскуватися у процесі корозії. Загальновідома «сезонна хвороба» прутків з латуні, які розтріскуються навіть при зберіганні.

Зазвичай вважають, що на міцність виробів впливають залишкові напруження першого роду. Однак напруження другого і третього родів у цьому сенсі не менш небезпечні, так як сприяють утворенню зон концентрації напружень

Значний вплив залишкові напруження мають на викривлення деталей при механічній обробці. Наприклад, при фрезеруванні поздовжніх шлиців або шпонкових канавок напруження збільшуються тільки з одного боку валу і розподіляються несиметрично. Це призводить до значного перекосу шпонкової канавки і викривлення валу. Звільнення залишкових напружень супроводжується деформацією розтягу-стиску, а при односторонній обробці і згином деталей.

Формування залишкових напружень у деяких виробих може бути корисним з точки зору поліпшення їх експлуатаційних характеристик, наприклад, продовження терміну служби. Так, наявність великих поверхневих залишкових напружень стиску може значно поліпшити характеристики навантажених деталей з точки зору опору втоми. З іншого боку, відомо чимало виробів, в яких наявність характерних для них залишкових напружень призводить до несподіваного їх руйнування або сильного

спотворення форми після обробки різанням. У процесі проектування і при виготовленні деталей необхідно якомога повніше використовувати усі позитивні сторони наслідків залишкових напружень. Експерименти ж, виконані за останні роки, показали, що в окремих випадках і залишкові напруження розтягу можуть бути корисними.

1.3 Визначення залишкових напружень для валів

Існують два методи визначення залишкових напружень в деталях типу валів: фізичні і механічні. Механічні методи у свою чергу можуть ділитися на експериментальні і розрахункові. Експериментальні методи визначення залишкових напружень досить прості та надійні. Завдяки цьому вони отримали широке поширення в дослідницькій практиці наукових і заводських лабораторій. Завдання механічних методів визначення залишкових напружень полягає у тому, щоб за відомою складності значень напружень (або деформацій) визначити їх напруження на поверхні зрізу.

Основними фізичними методами, застосовуваними для вимірювання залишкових напружень в металах, є: рентгенівські, ультразвукові, електромагнітні, метод твердості, метод крихких покриттів тощо.

Ультразвуковий метод визначення зварювальних залишкових напружень заснований на залежності швидкості поширення ультразвукової хвилі в металах від напруженого стану в них. Вимірюють швидкості поширення ультразвуку на окремій ділянці металу до зварювання і після зварювання, і по зміні швидкості судять про значення залишкового напруження. При вимірюванні у шві та біля шовної зони неоднорідність властивостей може призводити до помилок результатів. Позитивною властивістю даного методу, так само як електромагнітного, слід вважати мобільність проведення експериментів, які не потребують великих підготовчих робіт.

Доволі перспективними для промислового застосування є рентгенівські методи, при яких залишкові напруження визначаються за зміною кристалічних решіток поверхневого шару.

Рентгенівський метод визначення залишкових напружень дозволяє безпосередньо виміряти деформації кристалічної решітки при впливі напружень. Основна перевага рентгенівського методу полягає у тому, що залишкові напруження визначаються без руйнування деталі. Метод може бути використаний не тільки для дослідження, але і для контролю технологічного процесу. Рентгенівський метод не позбавлений недоліків: напруження визначаються тільки у поверхневому шарі, точність визначення порівняно невисока. Однак можливість визначення залишкових напружень без руйнування деталі робить рентгенівський метод надзвичайно перспективним. Цей метод заснований на визначенні відстані між кристалографічними площинами за допомогою вимірювання кута відбиття променя. При такому розсіюванні і відбувається інтерференція променів, в результаті якої тільки у певних напрямках інтенсивність променів збільшується, тоді як в інших напрямках послаблюється.

Одна зі схем визначення залишкових напружень – монохроматичний рентгенівський промінь. Його спрямовують вузьким пучком на досліджувану поверхню металу, відбиті промені фіксуються на рентгенівській плівці у вигляді кільцевого затемненого сліду.

Існує схема вимірювання кута відбиття за допомогою лічильника випромінювання. Рентгенівський промінь відокремлюється від поверхні металу, камера лічильника здійснює періодичний коливальний рух, фіксуючи інтенсивність випромінювання для даного кута. Ця схема отримала останнім часом все більшого практичного застосування.

Розглянемо деякі механічні методи для визначення залишкових напружень у деталях типу валів.

Метод Лінікуса. Метод заснований на принципі зміни кривизни прутка після видалення деякого шару металу з одного боку поверхні (зазвичай до середини). За величиною максимального прогину осі прутка обчислюються залишкові напруження.

Метод поперечних надрізів. Циліндр обробляється у поперечному перерізі до середини, але, на відміну від способу Лінікуса, обробляється ділянка певної довжини. Проріз порушує стан рівноваги внутрішніх напружень і тіло прогинається.

За максимальну величину прогину розраховуються залишкові напруження на поверхні деталі. При цьому передбачається, що напруження розподіляються вздовж радіуса за законом прямої лінії. Замість широких прорізів можна виготовляти тонкої дисковою фрезою переривчасті надрізи, розташовані один від одного на невеликій відстані.

Метод видалення частини поверхні. Полягає у вимірюванні прогинів або деформацій циліндра, що виникають після видалення поверхневих шарів в межах центрального кута. У тонкому валі відсутні дотичні залишкові напруження, а також напрошується необхідність додаткового проведення досліджень в разі, коли розглянутий метод застосовується для оцінки неасиметричних залишкових напружень.

Метод дисків. Суть методу полягає у тому, що з циліндра вирізається диск товщиною 0,2 діаметра, який потім розсвердлюється і пошарово розточується. Після видалення чергового шару металу за допомогою мікроіндикатора вимірюється деформація диска і розраховуються радіальні та тангенціальні напруження. Якщо вирізати з поверхні циліндра смужку, то зі зміною їх кривизни можна визначити і осьові залишкові напруження.

Спосіб розточування циліндра. Спосіб визначення залишкових напружень заснований на вимірюванні осьових і тангенціальних деформацій циліндра при послідовному видаленні внутрішніх концентричних шарів металу. За результатами вимірювань деформацій розраховують компоненти тензора залишкових напружень у деформованому тілі. При цьому застосовують наступні припущення:

- матеріал досліджуваного тіла ізотропний, суцільний, однорідний;
- деформації циліндра, що виникають в результаті зняття внутрішніх напружень, мають пружний характер;
- залишкові напруження у будь-якому поперечному перерізі на досліджуваній довжині циліндра розподіляються асиметрично;
- залишкові напруження задовольняють наступним умовам рівноваги і граничним умовам на контурі циліндра.

Спосіб обточування і розточування одного циліндра. В основі методу лежить зміна тангенціальних і осьових деформацій циліндра при послідовному

видаленні внутрішніх (зовнішніх) концентричних шарів металу. При цьому будується залежність відносних деформацій циліндра від радіуса віддаленого шару. За результатами вимірювання деформацій розраховують компоненти тензора залишкових напружень. Деформації кінцевого зразка визначають методом інтерполяції.

Залишкові напруження у центральній області циліндричної заготовки визначені вимірюванням на зовнішній поверхні циліндра осьових і тангенціальних деформацій. Вони зникають при послідовному видаленні внутрішніх концентричних шарів. Центральні шари металу видаляють свердлінням та подальшим розточуванням зразка.

По вимірним деформаціям розраховують осьові, тангенціальні і радіальні залишкові напруження.

1.4 Вплив поверхнево-пластичного деформування на якість виробів

Аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів показав, що в процесі отримання і обробки деталей машин їх властивості можуть істотно змінюватися. Причиною служать умови і режими обробки. Відомі технологічні процеси, які спеціально створювали для покращення якості осьових виробів [26-43].

Поверхнєво-пластичне деформування в технології машинобудування застосовують вже понад 80 років. За цей час розроблено різноманітні види зміцнення (дробеструминна обробка, обкочування кульками та роликками, карбування, віброударне деформування, алмазне вигладжування та ін.). Діапазон зміцнюваних деталей широкий за номенклатурою та розмірами: від дрібних деталей приладів до великих валків прокатних станів. Зміцнюють найбільш напружену робочу частину ріжучого інструменту, зварні шви унікальних металоконструкцій, циліндри високого тиску та інші вироби.

Методи поверхневого пластичного деформування є одними з найбільш поширених способів чистої та оздоблювальної обробки деталей. Це пояснюється їх технологічними перевагами: досить високою продуктивністю, універсальністю (дозволяє обробляти зовнішні, внутрішні, плоскі та фасонні поверхні на

металорізальних верстатах усіх основних типів), досить високою стійкістю і надійністю обкатування інструменту.

Застосування абразивних методів, таких як шліфування, хонінгування і доведення для оздоблювальної обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів дозволяє отримати необхідну точність і форму деталей, але часто не забезпечує оптимальну якість поверхневого шару. Необхідна якість виробів часто досягається за допомогою додаткових способів обробки, до числа яких належить поверхневе пластичне деформування (ППД). До таких методів при виробництві деталей типу вал можна віднести алмазне накочування (виглажування), яке завдяки високій продуктивності, та мобільності процесу обробки, простоті реалізації є одним з найбільш використовуваних і універсальних методів зміцнення. Аналіз процесів поверхневого пластичного деформування, їх технологічних можливостей забезпечення високого рівня якості деталей, а також високих вимог, пред'явлених до надійності і ресурсу валів дозволив зробити висновок про перспективність методу алмазного накочування (виглажування).

При пластичному зміцненні таким способом досягається зміна ряду показників властивостей матеріалу: виникають залишкові напруження стиску; кристалічна решітка матеріалу зазнає пружно-пластичного спотворення, що призводить до формування залишкових макронапружень; підвищується опір пластичної деформації при циклічних експлуатаційних навантаженнях; підвищуються межі міцності і текучості, згладжування мікрогребінців оброблюваної поверхні і заповнення западин мікропрофілю об'ємом zdeформованих гребінців; трохи знижуються характеристики пластичності (відносне подовження і поперечне звуження); на кілька порядків підвищується щільність дислокацій, що концентруються в основному навколо ліній ковзання; у невеликих межах знижується питома щільність деформованого матеріалу.

Обробка алмазним накочуванням супроводжується появою у поверхневому шарі достатньо великих і сприятливих для експлуатаційних якостей залишкових напружень стиску. Основні переваги методів поверхнево пластичного деформування такі:

- можливість отримання поверхні із дуже малою шорсткістю ($R_a = 0,1 - 0,05$ мкм) та зі значною несучою часткою профілю нерівностей, що гарантує значну міцність пресових з'єднань;

- після обробки пластичним деформуванням на поверхні виробу відсутні тверді частки абразиву та стружка;

- можливість формування сприятливих технологічних залишкових напружень, щоб покращити механічні властивості виробів;

- при пластичній соробці тиском забезпечується збереження безперервності внутрішніх волокон металу, підвищується твердість і в поверхневому шарі глибиною декілька міліметрів утворюється стискаючі залишкові напруження;

- поверхневий шар виробу, оброблений ППД забезпечує малий коефіцієнт тертя, хорошу адгезію змащувальних речовин і гальванічного покриття, володіє більшою відбиваючою здатністю.

В області технології обробки перевага алмазного наскочування також беззаперечна.

- велика зчепність інструменту, що полегшує автоматизацію процесу та застосування інструмента на автоматизованих лініях та оброблювальних центрах;

- можливість використання інструмента на універсальних верстатах, а також простота їх обслуговування;

- низькі витрати на потужність, економія металу за рахунок застосування безстружкових методів обробки;

- можливість заміни ППД трудомістких операцій залишкового шліфування (хонінгування, притирання, полірування); вартість ППД приблизно в 4 рази нижче, ніж обробка шліфуванням і точінням.

Застосування природних алмазів для обробки ППД якісно змінює цей процес. Створюється можливість отримати виключно високий клас чистоти поверхні майже на всіх пластичних металах і сплавах будь-якої твердості. Зусилля, з яким здійснюється процес вигладжування алмазом, дозволяють обробляти тонкостінні і маложорсткі вироби при цьому зміцнюється поверхневий шар і в ньому утворюються залишкові стискаючі напруження. Все це стає можливим завдяки

винятковим фізико-механічними та експлуатаційними властивостями алмазу, як інструментального матеріалу.

Питанню досліджень процесу вигладжування виробів алмазними інструментами присвячено ряд робіт вітчизняних і зарубіжних авторів [31, 32]. Перші дослідження процесу були виконані Холлом. Для дослідження процесу вигладжування він використовував алмазні інструменти з циліндричної і сферичної робочими поверхнями. Дослідження показали, що в процесі вигладжування безпосередньо перед інструментом з боків і під ним відбувається стиснення і пластична деформація металу, який після проходження інструменту розвантажується від напружень, що не перевищують межу пружності. Залатини, що знаходяться між гребінцями мікронерівностей, якщо вони не дуже глибокі, заповнюються металом у результаті впливу інструменту.

При виготовленні та експлуатації деталей машин на їх поверхнях утворюються нерівності та мікронерівності, а шар металу, безпосередньо прилеглий до поверхні, змінює структуру, фазовий і хімічний склад, в ньому виникають залишкові напруження. Надійність роботи технологічних машин безпосередньо пов'язана із якістю поверхневого шару деталей, яке характеризується геометричними і фізико-механічними параметрами. У зв'язку з інтенсифікацією експлуатаційних процесів, збільшенням швидкостей переміщення робочих органів, підвищенням температур і тисків роль якості поверхневого шару значно зростає. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна поверхня повинна бути достатньо твердою, повинна мати стискаючі залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, вигладжену форму мікронерівностей із великою площею опорної поверхні.

За умов експлуатації поверхневий шар деталі піддається найбільш сильному фізико-хімічному впливу: механічному, тепловому, магнітоелектричному, світловому, хімічному тощо. В більшості випадків у деталі починають погіршуватися службові властивості поверхні, наприклад, знос, ерозія, кавітація, корозія, втомні тріщини та інші руйнування розвиваються на поверхні. Тому до поверхневого шару пред'являються зазвичай вищі вимоги, ніж до основного шару деталі.

Основними причинами виникнення мікронапружень є неоднорідність пластичної деформації, локальний, неоднорідний нагрів металу поверхневого шару, а при наявності перетворень – різниця об'ємів структур, що виникають. Мікронапруження є наслідком фазових перетворень, зміни температури, анізотропії механічних властивостей окремих зерен і розпаду зерен на блоки при пластичній деформації.

Алмазне вигладжування є одним з передових статичних методів поверхнево пластичного деформування. Полягає у пластичній деформації (ППД) оброблюваної поверхні ковзаючим по ній інструментом-накочувачем. Інструмент розсовує метал, утворюючи канавку на поверхні. При цьому створюються осередок деформування в залежності від співвідношення глибин впровадження інструменту та вихідних параметрів шорсткості.

У результаті пластичного деформування оброблюваної поверхні згладжуються вихідні нерівності і утворюється новий мікро рельєф поверхні із значно меншою висотою нерівності профілю. Розмір деталі зменшується на величину залишкової деформації.

Початковими параметрами, що визначають протікання процесу на кромках деталі, є попередній натяг. Він задається до початку наколювання. Основною перевагою алмазного наколювання є можливість формування необхідних залишкових напружень за усім об'ємом деталей.

1.5 Внутрішнє тертя та його вплив на експлуатаційні показники

Частинки у твердому матеріалі можуть зазнавати впливу тертя. Наприклад, якщо твердий металевий стрижень навантажити, то всі частинки в зоні пластичної деформації переміщуються. Активному переміщенню частинок перешкоджає внутрішнє тертя.

Кристалічні тверді тіла складаються з великого числа зерен, розділених між собою межами. Кожне зерно має дефекти. Зерна мають різне орієнтування. При додаванні зовнішнього напруження до металу (при зміцненні методом ППД) пластична деформація у першу чергу відбудеться у зерні, найбільш сприятливо

орієнтованому до зовнішньої напруги (тобто з найбільшим дотичним напруженням). Із ростом зовнішнього напруження спостерігається поступове залучення інших зерен у процес пластичної деформації при збереженні суцільності зерна. Кількість дефектів у зерні зменшуються, і зерна більш жорстко з'єднуються один з одним, тобто тертя між зернами підвищується. Це дозволяє обмежувати ковзання кристалічних решіток в металі, а значить поліпшується здатність матеріалу чинити опір деформації під дією зовнішніх впливів.

За останній час метод внутрішнього тертя отримав досить широке поширення для вирішення завдань у галузі матеріалознавства. Внутрішнє тертя у металах, особливо в листях, дуже чутливе до холодної деформації. Навіть при дуже обережному маніпулюванні з чистим, відпаленим монокристалом його внутрішнє тертя може збільшитися у кілька разів. Крім того, опромінення нейтронами або гамма-променями значно зменшує внутрішнє тертя. Механічна енергія твердого тіла, що коливається, дуже швидко перетворюється у тепло, навіть якщо тіло повністю ізольовано від навколишнього середовища. Це перетворення енергії, а також подальше згасання коливань приписують наявності внутрішнього тертя. Можна сформулювати це інакше: внутрішнє тертя – це розсіювання енергії пружних коливань за рахунок внутрішніх процесів у твердому тілі. При цьому механічна енергія перетворюється на теплову, яка відводиться поступово в зовнішнє середовище.

Внутрішнє тертя представляє також інтерес з технічної точки зору. Розроблено спеціальні матеріали з високим рівнем внутрішнього тертя (матеріали високого демпфування), які застосовуються для виготовлення деталей різних конструкцій, машин, приладів, у яких високий рівень розсіювання енергії механічних коливань призводить до їх швидкого гасіння. Наприклад, такі функції поряд з чисто конструктивними виконує чавунна станина металорізального верстата або металева прокладка головки блоку двигуна внутрішнього згоряння. В інших випадках потрібні матеріали з дуже низьким загасанням, наприклад металеві матеріали для звукопроводів або кварц для кварцових генераторів.

Методи вимірювання внутрішнього тертя діляться на три основні групи:

а) метод крутильного маятника; б) метод резонансних коливань; в) метод

ультразвукового імпульсу. Необхідно відзначити, що ці методи зазвичай дають можливість проводити вимірювання у порівняно малому інтервалі частот, що сильно обмежує одержувані на даному зразку результати. Крім того, якщо зразок у формі стержня знаходиться під дією поздовжніх, поперечних або обертальних коливань, деформація має неоднорідний характер і вимірне значення внутрішнього тертя є середнім, відповідно деформаціям в різних частинах зразка.

Метод крутильного маятника. Перші вимірювання внутрішнього тертя були виконані за допомогою крутильного маятника. Зразок імітує форму дроту, до якого прикріплено інерційна система, що забезпечує період коливань близько 1 с. Частина інерційної системи можна виготовити з феромагнітного матеріалу, в цьому випадку порушувати коливання доцільно електромагнітним способом. Внутрішнє тертя зазвичай вимірюється по загасанню вільних коливань. Послідовні амплітуди реєструються за допомогою дзеркальця, освітлювача та шкали або за допомогою спеціального автоматичного пристрою. Крутильний маятник зазвичай не придатний для проведення вимірювань на зразках з дуже низьким внутрішнім тертям. Цей метод може бути застосований для вимірювання внутрішнього тертя дріткового зразка.

Метод резонансних коливань. Найбільш часто застосовується метод вимірювання внутрішнього тертя, у якому зразок у формі прутка створює власні коливання без застосування допоміжної інерційної системи. У цьому випадку частота залежить від розмірів зразка і зазвичай має порядок 1 кГц для коливань вигину і 30 кГц для поздовжніх коливань. Для збудження коливань застосовуються різні електричні та магнітні методи.

Резонансний метод можна застосовувати у разі зразків з великим розсіюванням шляхом вимірювання ширини резонансної кривої при вимушених коливаннях, а для зразків з малим розсіюванням – вимірюванням загасання вільних коливань. Цей метод можна застосовувати у широкому інтервалі амплітуд деформації. Недоліком цього методу є те, що внутрішнє тертя можна вимірювати тільки при основній резонансній частоті зразка і, можливо, при одній або двох гармоніках. Зроблено спробу подолати це обмеження за допомогою зміни резонансної частоти зразка при поперечних коливаннях шляхом навантаження його в центрі та на кінцях.

Імпульсний ультразвуковий метод. У мегагерцевій області частот внутрішнє тертя можна вимірювати імпульсним ультразвуковим методом. За допомогою п'єзоелектричного кристалу в одному кінці зразка збуджується короткий ультразвуковий імпульс; загасання в зразку вимірюється по амплітуді імпульсу, що проходить через зразок, у другий кристал. Інтерпретацію результатів дослідження загасання слід проводити з обережністю через ефекти розсіювання.

Амплітуди деформації при застосуванні імпульсного ультразвукового методу зазвичай занадто малі, щоб за допомогою цього методу вимірювати характеристики, що залежать від амплітуди.

1.6 Методи впливу на згинальну жорсткість

Жорсткість валів та осей при вигині повинна бути достатньою для забезпечення надійної роботи виробів машинобудування. Згинальна жорсткість стрижня являє собою спротив викривлення при зовнішньому впливі. Жорсткість валів і осей оцінюється величиною прогину в місцях установки деталей або кутом закручування поперечних перерізів. Мала згинальна жорсткість стрижневих деталей викликає суттєві проблеми при їх обробці та у зборі. При деформаційному зміцненні довгомірних маложорстких валів виникають деформації і прогини, для запобігання яких доводиться жертвувати продуктивністю технологічного процесу.

Головні конструктивні способи підвищення жорсткості деталей без суттєвого збільшення маси: всебічне усунення згину, заміна його розтягом або стиском; для деталей, що працюють на згин, доцільна розстановка опор; раціональне (що не супроводжується зростанням маси) збільшення моментів інерції перерізів; блокування деформацій введенням поперечних і діагональних зв'язків.

Підвищена жорсткість деталей, що працюють на розтяг-стиск, в кінцевому рахунку обумовлена кращим використанням матеріалу при цьому виді навантаження. У разі вигину та кручення навантажені переважно крайні волокна перетину. Межа навантаження настає, коли напруження в них досягають небезпечних значень, тоді як осердя залишається недовантаженим. При розтязі-стиску напруження однакові за усім перерізом; матеріал використовується

повністю. Межа навантаження настає, коли напруження в усіх точках перерізу теоретично одночасно досягають небезпечного значення. Крім того, при розтягу-стиску деформації деталі пропорційні першому ступеню її довжини. У разі ж вигину дія навантаження залежить від відстані між площиною дії згинальної сили і небезпечним перетином; деформації тут пропорційні третьому ступеню довжини.

Жорсткість довгомірних деталей залежить від умов навантаження, геометрії виробу та фізико-механічних властивостей матеріалу. При визначенні згинальної жорсткості визначають модуль пружності першого роду (модуль Юнга) матеріалу валу і момент інерції перерізу. При холодній обробці металів модуль Юнга практично не змінюється. Однак для загальної жорсткості валу відіграє роль додатковий вплив насаджених деталей (зокрема, дисків), що підвищує місцеву жорсткість. При наявності по довжині валу багатьох деталей, сумарна протяжність довжин посадок яких становить значну частку довжини валу, загальна згинальна жорсткість може істотно збільшуватися.

У рішенні проблеми підвищення згинальної жорсткості довгомірних валів може бути два напрямки. Перший підхід пов'язаний з підбором оптимальної геометрії поперечного перерізу стрижня. Цей напрямок тісно пов'язаний із металоконструкціями, в яких стрижні слугують силовими елементами.

Бідний спосіб підвищення згинальної жорсткості за рахунок перетворення геометрії самого виробу. Для підвищення жорсткості стрижневих виробів використовують різні поздовжні ребра або змінюють форму поперечного перерізу або її орієнтацію по відношенню до силового впливу. Недолік способу полягає в тому, що геометричні перетворення форми виробу не завжди можливі з конструктивних міркувань, і крім цього, це додаткові технологічні та економічні витрати. Зазначені вище деталі типу валів і осей служать для передачі обертального руху і крутного моменту. Такі вироби мають зазвичай поперечний переріз у вигляді кола або кільця, і питання про зміну геометрії перетину практично відпадає. Таким чином, завдання має обмеження – потрібно підвищити жорсткість стержня круглого поперечного перерізу.

Розглянемо другий підхід, який стосується механічних властивостей матеріалу виробу. Тут також можна виділити два напрямки. Перше стосується підбору

матеріалу, його хімічного складу, який забезпечував би необхідні механічні властивості виробу. Підсумком такого підходу зазвичай виходить матеріал з досить високою собівартістю.

Відомий спосіб зміни згинальної жорсткості за рахунок температурного впливу. Висока температура сприяє знизженню, а низька – підвищенню згинальної жорсткості. Недолік способу полягає у тому, що згинальна жорсткість залежить від зовнішніх температурних умов, які можуть не збігатися з реальними умовами роботи техніки.

Другий напрямок – технологічний. З літературних джерел і практики підприємств відомо, що в процесі стримання і обробки металовиробів їх властивості можуть істотно змінюватися. Причиною служать умовні режими обробки. Відомі технологічні процеси, які спеціально створювалися для покращення готових виробів.

Відомий спосіб підвищення згинальної жорсткості за рахунок зміни фізико-механічних властивостей матеріалу виробу. Фізичні властивості виробу оцінювали модулем пружності першого роду. Аналіз літературних джерел показує, що змінити модуль пружності технологічними способами практично неможливо. Він істотно змінюється при температурних впливах, але як уже було сказано вище, це не завжди прийнятне. Зміна механічних властивостей стрижневої деталі можлива при заміні марки металу. Найбільш істотно модуль пружності можна змінити при заміні кольорового металу на чорній, але це не завжди можливо з технічних вимог до виробу і пов'язане з економічними питаннями.

Для підвищення якості залізобетонних виробів використовують попередній натяг арматури. Після затвердіння бетону за рахунок напруженої арматури у виробі формуються стискаючі напруження, які підвищують надійність конструкції в процесі експлуатації.

На підставі викладеного можна стверджувати, що для підвищення згинальної жорсткості стрижневих деталей валів необхідно прикласти осьове розтягувальне навантаження. Однак для роботи реальних стрижневих деталей це неприйнятно.

Аналіз виробничого досвіду виготовлення нежорстких довгомірних валів в індивідуальному, дрібносерійному і серійному виробництвах показав, що

традиційні способи обробки жорстких деталей малоефективні для виробництва нежорстких валів, тому питання їх виготовлення на практиці вирішується обмеженням режимів обробки, введенням операцій ручного доведення. Для зменшення прогинів при механічній обробці доводиться зменшувати частоту обертання заготовки, подачу, глибину різання, що автоматично призводить до зниження продуктивності праці і підвищенню тривалості технологічного процесу обробки. Такий підхід істотно збільшує трудомісткість обробки і не гарантує необхідної якості виробів. У зв'язку вище викладеним, вдосконалення технологічних процесів виготовлення нежорстких валів є важливим завданням, що підвищує ефективність виробництва та якість продукції машинобудування.

Пропонується розглянути управління згинальною жорсткістю валів за рахунок формування технологічних залишкових напружень. Але вони завжди бувають двох видів – розтягу і стиску, тому що вони врівноважені в об'ємі тіла. Для підвищення жорсткості стрижневих виробів доцільно використовувати охоплююче поверхневе пластичне деформування, а саме метод алмазного накочування, при якому можна сформувати необхідні залишкові напруження за усім об'ємом.

Висновки до розділу 1

1. До довгомірних деталей типу «вали» відносяться вали насосів, ступиці гармат, гільзи двигунів, труби трансмісії, ходові гвинти і валики металорізальних верстатів, осі, валики текстильних машин, деталі гочних приладів, колінчасті вали, шатуни, деталі турбін, гребні вали судів, оправки для інструменту тощо.

2. Технологія для обробки поверхневим пластичним деформуванням жорстких валів (великого діаметра і малої довжини) не може бути використана для обробки маложорстких валів без істотного збільшення жорсткості системи. Труднощі обробки таких деталей, як вали та осі великої довжини пов'язані з їх недостатньою жорсткістю, внаслідок чого виникають значні деформації.

3. При виготовленні деталей машин формуються залишкові напруження. Вони мають різний вплив на якість поверхневого шару, експлуатаційні характеристики деталей машин. Для визначення об'ємних полів розподілу залишкових напружень в

довгомірних циліндричних деталей надійні стійкі результати дає спосіб поздовжнього розпилювання, спосіб обточування і розточування одного циліндра. Для визначення залишкових напружень у поверхневих шарах широке застосування отримав рентгенівський метод.

4. Методи поверхневого пластичного деформування не тільки підвищують якість поверхневого шару виробів, але й дозволяють формувати сприятливі технологічні залишкові напруження для підвищення якості виробів. Внутрішнє тертя між кристалами в матеріалі може впливати на зміну згинальної жорсткості.

5. Жорсткість довгомірних деталей залежить від умов навантаження, геометрії виробу та фізико-механічних властивостей матеріалу. Відомий спосіб підвищення згинальної жорсткості за рахунок перетворення геометрії самого виробу. Недолік способу полягає у тому, що геометричні перетворення форми виробу не завжди можливі з конструктивних міркувань, окрім цього, це додаткові технологічні та економічні витрати.

6. Відомий спосіб зміни згинальної жорсткості за рахунок температурного впливу. Недолік способу полягає в тому, що згинальна жорсткість залежить від зовнішніх температурних умов, які можуть не збігатися з реальними умовами роботи техніки.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для управління жорсткістю валів необхідно знати точний розподіл і величину залишкових напружень в об'ємі тіла. У циліндричних деталях можуть бути сформовані осьові σ_z , тангенціальні σ_φ і радіальні σ_r залишкові напруження.

При всіх механічних методах визначення напружень робочий процес складається з трьох основних етапів: видалення точно встановлених шарів або елементів об'єму тіла; вимір деформацій, викликаних видаленням потрібного шару; розрахунок напружень по вимірним деформаціям.

2.1 Інструмент для обробки нежорстких валів

Вибір конструкції робочого інструмента визначається основними якісними показниками обробки поверхневого шару. Однорідність зміцнення, відсутність зігнутої валу, мала величина залишкових напружень, їх зрівноваженість та рівномірна релаксація під час експлуатації та інші показники пов'язані з величиною зусилля притискання інструменту. Інструмент повинен забезпечувати сталість цього зусилля при будь-яких змінах форми деталі, наявності просторової похибки та наявності коливань в технологічній системі. Для виключення деформації згину заготовки зусиллям притискання деформуючого елемента необхідний інструмент з повним силовим замиканням.

Сутність процесу алмазного накочування полягає в обробці поверхневого шару деталі інструментом, робочою частиною якого є сферична поверхня алмазного кристалу із радіусом заокруглення 1...3 мм. Алмаз встановлюється у наконечнику, який входить в пружинну оправку, закріплену в різьб'єтримачі супорта токарного верстата (рисунки 2.1).

Для підвищення ефективності застосування алмазного накочування необхідно правильно орієнтувати монокристал алмазу по вектору твердості, виконати заокруглення робочої частини інструменту, підготувати оброблювану поверхню за

формою, розміром, шорсткістю і властивостями поверхневого шару, а також суворо дотримуватися режимів і умов обробки.

Рисунок 2.1 – Інструмент для алмазного наковчування:

а – зі сферичною формою робочої частини алмазу; б – з циліндричною формою;
в – кріплення алмазу в державці (1 – кристал алмазу, 2 – припой, 3 – державка)

При алмазному наковчуванні деформуючим інструментом служить кристал алмазу, закріплений у спеціальній оправці. Закріплюють алмаз найчастіше лайкою срібним припоєм, мають порівняно низьку температуру плавлення (600-650 °С). Тиск при наковчуванні з пружним контактом зазвичай створюється за допомогою тарованої пружини. При обертанні оброблюваної деталі бездовжно подачу здійснює різець. Вигладжування відбувається при терті ковзання, що відрізняє процес наковчування від обкатування. Внаслідок високої твердості алмаза вигладжування ефективно для обробно-зміцнюючої зборки деталей з різних матеріалів і, зокрема, із загартованих сталей.

2.2 Методика проведення експерименту

2.3 Визначення осьових залишкових напружень

2.5 Визначення тангенціальних залишкових напружень

2.6 Вимірювання деформацій та контроль напружень

Рисунок 2.6 – Пристосування для вимірювання деформацій циліндричних зразків після механічної обробки: 1 – основа, 2 – фіксатор положення, 3 – зразок, 4 – індикатор, 5 – направляючі

Висновки до розділу 2

1. Для ефективного управління жорсткістю та експлуатаційними властивостями валів необхідно знати розподіл та величину залишкових напружень у матеріалі, зокрема осьових, радіальних і тангенціальних складових.

2. Конструкція інструменту для алмазного накочування повинна забезпечувати сталість зусилля притискання, що мінімізує викривлення заготовки та сприяє рівномірності зміцнення поверхні.

3. Запропонована методика проведення експерименту дозволяє із високим рівнем точності визначати мікротвердість та залишкові напруження після зміцнювальної обробки.

4. Для визначення величини залишкових напружень використано три взаємодоповнюючі методи:

- метод поздовжнього розпилювання для оцінки осьових напружень;
- метод дисків для визначення радіальних та тангенціальних напружень;
- метод вимірювання деформацій із використанням мікроіндикаторів.

5. Методики, використані у роботі можуть бути рекомендовані для виробничого контролю якості поверхневого зміцнення валів та інших деталей, що зазнають циклічних навантажень під час роботи.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Вплив параметрів обробки на показники якості

Рисунок 3.1 – Залежність шорсткості поверхні від зусилля притискання накочувача при різних кількостях проходів для сталі 40Х

Рисунок 3.4 – Зміна залишкових напружень у поверхневому шарі деталі за глибиною для сталі 40Х

Рисунок 3.5 – Залежність потужності алмазного накочування від швидкості подачі для сталі 40Х

Полтавський державний аграрний університет

На підставі проведених комплексних теоретико-експериментальних досліджень розроблені рекомендації щодо оптимізації та розширення технологічних можливостей процесу алмазного накочування легованої сталі 40Х:

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека ведення операції алмазного накочування

Процес алмазного накочування, як одна з операцій зміцнювальної механічної обробки поверхонь, супроводжується дією значних зусиль тиску, обертанням заготовок та рухом інструмента. Тому під час виконання операції необхідно суворо дотримуватись вимог охорони праці та техніки безпеки.

Де виконання операції алмазного накочування допускаються лише кваліфіковані працівники, які пройшли інструктаж із охорони праці, ознайомлені із конструкцією верстату, правилами його експлуатації, мають відповідну групу допуску до роботи з електрообладнанням.

Робоче місце має бути добре освітлене, очищене від сторонніх предметів, а підлога – суха, неслизька. Оператор повинен працювати у спеціальному одязі (халат чи комбінезон), захисних окулярах та щільних рукавицях.

Під час проведення операції алмазного накочування необхідно:

- перед початком роботи перевірити справність верстату, затискних пристроїв, системи охолодження, а також цілісність алмазного інструменту;
- переконатися у правильності закріплення заготовки, надійності фіксації інструмента;
- не допускати роботи верстату із відкритими або знятими захисними кожухами;
- контролювати подачі мастильно охолоджувальної рідини (МОР) для запобігання перегрівання заготовки та інструменту;
- у разі виникнення сторонніх шумів, вібрацій або перегріву необхідно негайно зупинити верстат та усунути несправність.

Не слід забувати, що під час алмазного накочування забороняється проводити ручне очищення поверхні або корекцію положення інструмента на верстаті, що працює.

Усі верстати для алмазного накочування повинні бути заземлені. Перед початком зміни оператор зобов'язаний перевірити справність електричних з'єднань

та наявність заземлення. У зоні проведення робіт необхідно мати вогнегасник відповідного типу (вуглекислотний або порошковий). Заборонено зберігати легкозаймисті рідини поруч із робочою зоною верстату.

Робоче місце оператора повинно відповідати наступним ергономічним вимогам:

- зручне розташування органів керування;
- належна висота робочої поверхні;
- достатнє освітлення (не менше 300 лк).

Рівень шуму під час роботи верстата не повинен перевищувати 80 дБА. Повітря робочої зони повинно очищуватися від аерозолів МОР за допомогою місцевої витяжної вентиляції.

У випадку поломки інструменту, порушення кріплення заготовки, виток МОР необхідно негайно зупинити верстат натисанням кнопки аварійного вимкнення, повідомити керівника зміни та усунути несправність тільки після повного знеструмування обладнання. Після закінчення роботи верстат необхідно вимкнути від мережі, очистити робочу зону, здати зміну відповідно до встановленого порядку.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний аналіз процесу поверхневого зміцнення валів алмазним накочуванням є аналізом порівняльної економічності її варіантів з точки зору витрат праці, обумовлених її застосуванням. У відмінностях складу та величини витрат праці знаходять узагальнену характеристику переваги та недоліки технічного, організаційного та соціального порядку.

Аналіз порівняльної економічності запропонованої технології полягає у розрахунку витрат за порівнюваними варіантами, у встановленні економічного ефекту, який одержується у результаті застосування передбачених варіантів засобів та способів порівняно з базовими, економічною ефективністю додаткових капітальних вкладень та інших обмежених ресурсів (якщо вони потрібні), областей ефективного застосування порівнюваних засобів і способів, економічно оптимальних значень параметрів, що забезпечують максимальну раціональність їх застосування.

Економічний ефект від запровадження оптимізованого процесу алмазного наочування валів, порівняльна економічність залежать від того варіанту, з яким вона буде порівнюватися. При визначенні порівняльної техніко-економічної прогресивності нової технології у якості бази для порівняння приймаємо варіант обробки, який застосовується в реально діючому базовому технологічному процесі обробки зразків.

В умовах базового технологічного процесу обробка циліндричних поверхонь до шорсткості $Ra = 0,08 - 0,09$ мкм здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті 16К20. Час обробки однієї деталі на даній операції – 10,5 хв. Згідно з проведеними дослідженнями нами обґрунтовано процес обробки циліндричних валів насоса за допомогою методу алмазного наочування. При цьому обробка здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті мод. 16К20, обладнаному пристосуванням з алмазним наочувачем. Час обробки однієї деталі на даній операції – 5,8 хв.

Для техніко-економічного порівняння варіантів необхідно підібрати раніше розроблені операції. По кожному варіанту операції має бути визначена технологічна собівартість, здійснено порівняння. Порівнянню підлягають однакові об'єми робіт, тобто обробка одних і тих же поверхонь, але різними методами.

Технологічна собівартість обробки заготовки складається з наступних витрат:

- вартості матеріалу заготовки;
- основної і додаткової заробітної плати виробничих робітників з нарахуванням по соціальному страхуванню;
- витрат на силову електроенергію;
- витрат на інструменти і пристосування;
- амортизаційних відрахувань від балансової вартості обладнання;
- витрат на утримання технологічного устаткування;
- витрат на поточний ремонт технологічного устаткування.

Розрахунок собівартості операції при виборі варіанту обробки може бути здійснений методом прямого розподілення витрат (методом калькуляції) або нормативним методом.

Витрати по усіх статтях технологічної собівартості обробки заготовки на операцію визначаються прямою калькуляцією:

$$C_{\text{од}} = Z_{\text{оп}} + Z_{\text{ен}} + Z_{\text{рі}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{ам}} + Z_{\text{утр}} + Z_{\text{рем}}, \quad (4.1)$$

де $Z_{\text{оп}}$ – заробітна плата робітника за виконання однієї операції;

$Z_{\text{ен}}$ – витрати на електроенергію;

$Z_{\text{рі}}$ – витрати на різальний інструмент;

$Z_{\text{пр}}$ – витрати на верстатні пристосування;

$Z_{\text{ам}}$ – амортизаційні відрахування від балансової вартості устаткування;

$Z_{\text{утр}}$ – витрати з утримання устаткування;

$Z_{\text{рем}}$ – витрати на поточний ремонт устаткування.

Вартість матеріалів і напівфабрикатів у даному розрахунку не враховуємо, так як вид заготовки та коефіцієнт використання матеріалу залишаються незмінними.

Заробітну плату робітника-верстатника при виконанні шліфувальної операції обробки плоских поверхонь зразка визначаємо за трудомісткістю обробки на одній операції:

$$Z_{\text{оп}} = T_{\text{шт}} \cdot T_3, \quad (4.2)$$

де $T_{\text{шт}}$ – штучний час обробки деталі на даній операції;

T_3 – тарифна ставка заробітної плати відповідного розряду роботи.

Як у випадку базового варіанту обробки, так і при розробленому варіанті обробку здійснює шліфувальник 3-го розряду, для якого годинна тарифна ставка становить $T_3^V = 1,74 \cdot 68 = 118,32$ грн. Таким чином, витрати на заробітну платню за базовим і розробленим варіантами обробки складуть:

$$Z_{\text{оп}}^{\text{БАЗ}} = 10,5/60 \cdot 118,32 = 20,71 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{оп}}^{\text{РОЗР}} = 5,8/60 \cdot 118,32 = 11,44 \text{ грн.}$$

Витрати на силову електроенергію включають витрати, пов'язані з експлуатацією верстата. Величина цих витрат, віднесена до обробки однієї заготовки на цій операції:

$$Z_{EH} = \frac{N_{VER} \cdot \eta_{II} \cdot T_0}{60 \eta_M \cdot \eta_B} C_E, \quad (4.3)$$

де N_{VER} – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

η_{II} – коефіцієнт завантаження електродвигунів верстата за потужністю (залежно від режиму різання металу $\eta_{II} = 0,5 \dots 0,9$);

T_0 – основний (технологічний) час на цю операцію, хв;

η_M – коефіцієнт, що враховує втрати в мережі, $\eta_M = 0,96$;

η_B – коефіцієнт корисної дії електродвигунів верстата, $\eta_B = 0,90 \dots 0,95$;

C_E – ціна 1 кВт·год електроенергії грн. (12 грн./кВт·год).

З урахуванням того, що встановлена потужність двигунів верстатів 11 кВт, маємо:

$$Z_{EH}^{БАЗ} = \frac{11 \cdot 0,5 \cdot 10,5}{60 \cdot 0,96 \cdot 0,93} \cdot 12 = 12,94 \text{ грн.};$$

$$Z_{EH}^{РОЗР} = \frac{11 \cdot 0,5 \cdot 5,8}{60 \cdot 0,96 \cdot 0,93} \cdot 12 = 7,15 \text{ грн.}$$

Витрати з експлуатації вимірювальних інструментів зазвичай порівняно малі. Так як засоби контролю по базовому та розробленому варіантах залишаються незмінними, то при розрахунках витрати на їх експлуатацію не враховуємо.

Витрати на оброблені інструменти, віднесені до операції

$$Z_{PI} = \frac{C_{II}}{T_E} \cdot T_{ШТ}, \quad (4.4)$$

де C_{II} – первинна вартість інструмента, грн.;

C_3 – витрати на повторне заточування до повного спрацювання різальних інструментів, грн.;

T_E – загальний час експлуатації різальних інструментів, 9000 хв.

Вартість алмазних накочувачів, як універсального заточувального інструменту

приймаємо за каталогами підприємства-виробника. Для двох варіантів вартість алмазного накочувача АСПК 3 ІПР-100-0000 СТМ-R1.5 0,7 кар. Становить 1000 грн.

Загальні витрати на металорізальні інструменти, віднесені до операції:

$$z_{\text{PI}}^{\text{БАЗ}} = \frac{1000}{9000} \cdot 10,5 = 1,2 \text{ грн.};$$

$$z_{\text{PI}}^{\text{РОЗР}} = \frac{1000}{9000} \cdot 5,8 = 0,64 \text{ грн.}$$

Витрати на пристосування і спеціальне оснащення верстатів:

$$z_{\text{ПР}} = \frac{C_0 \cdot K_{\text{ВИТ}} \cdot T_{\text{ШТ}}}{\Phi_0}, \quad (4.5)$$

де C_0 – загальна вартість пристосування або оснащення за фактичною або плановою оцінкою, грн. для використовуваної експериментальної оснастки $C_0 = 25000$ грн.;

$K_{\text{ВИТ}}$ – коефіцієнт збільшення вартості за рахунок витрат на поточний ремонт верстатних пристосувань, 1,25;

Φ_0 – фонд часу устаткування, верст.-хв. Так як вартість оснащення погашається зазвичай протягом 2 років, тобто $\Phi_0 = 2088 \cdot 2 \cdot 60 = 250560$ хв.

Для базування та фіксації заготовки при обробці як по базовому, так і по розробленому варіантах застосовуються верстатні пристосування однакової групи складності – експериментальні оснастки, тобто

$$z_{\text{ПР}}^{\text{БАЗ}} = \frac{25000 \cdot 1,25 \cdot 10,5}{250560} = 1,3 \text{ грн.}$$

$$z_{\text{ПР}}^{\text{РОЗР}} = \frac{25000 \cdot 1,25 \cdot 5,8}{250560} = 0,7 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизаційні відрахування на одиницю виробу

$$Z_{AM} = \frac{C_B \cdot H_{A.B.}}{100N}, \quad (4.6)$$

де C_B – первинна вартість устаткування, грн.;

$H_{A.B.}$ – норма амортизаційних відрахувань, $H_{A.B.} = 5,0\%$;

N – річний об'єм оброблюваних деталей, $N = 10000$.

Ціну верстатного устаткування приймаємо за прейскурантом оптових цін (з урахуванням коефіцієнту інфляції) – 150000 грн.

$$Z_{AM}^{БАЗ} = Z_{AM}^{РОЗР} = \frac{150000 \cdot 5,0}{100 \cdot 10000} = 0,75 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання верстатного обладнання, що доводяться на одиницю обробленої продукції

$$Z_{УТР} = \frac{C_{OB}}{N}, \quad (4.7)$$

де C_{OB} – витрати на утримання верстатного обладнання, 10000 грн.

Витрати на утримання верстатного обладнання залежать від його складності та часу роботи. До суми цих витрат включаються витрати на матеріали (мастильні, обтиральні, охолоджуючі рідини, паси і тощо) необхідні при експлуатації обладнання, і заробітну плату робітників-налагоджувальників.

У нашому випадку за умови аналогічності обладнання за базовим і розробленим варіантами приймаємо:

$$Z_{УТР}^{БАЗ} = Z_{УТР}^{РОЗР} = \frac{10000}{10000} = 1,0 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт обладнання в середньому досягають 10 %, а по

окремих видах устаткування 30-40 % його балансової вартості. Їх визначають за нормативами єдиної системи ППР:

$$Z_{\text{РЕМ}} = \frac{(H_M \cdot K_M + H_E \cdot K_E)}{N} \cdot K_T, \quad (4.8)$$

де H_M – норматив річних витрат на ремонт механічної частини обладнання, грн./рік, $H_M = 3000$;

H_E – норматив річних витрат на ремонт електричної частини обладнання, грн./рік, $H_E = 1000$;

K_M – категорія складності ремонту механічної частини обладнання, 25;

K_E – категорія складності ремонту електричної частини обладнання, 16,0;

K_T – коефіцієнт, що залежить від класу точності обладнання, 1,5.

$$Z_{\text{РЕМ}}^{\text{БАЗ}} = Z_{\text{РЕМ}}^{\text{РОЗР}} = \frac{(3000 \cdot 25 + 1000 \cdot 16)}{10000} \cdot 1,5 = 13,7 \text{ грн.}$$

З урахуванням проведених розрахунків сума витрат по усіх статтях технологічної собівартості складе:

$$C_{\text{СП}}^{\text{БАЗ}} = 20,71 + 12,94 + 1,2 + 1,3 + 0,75 + 1,0 + 13,7 = 51,6 \text{ грн.},$$

$$C_{\text{СП}}^{\text{РОЗР}} = 11,44 + 7,15 + 0,64 + 0,7 + 0,75 + 1,0 + 13,7 = 35,38 \text{ грн.}$$

Структура витрат по статтях технологічної собівартості представлена в таблиці 4.1.

На основі проведених розрахунків витрат по статтях технологічної собівартості для двох варіантів фінішної обробки плоских поверхонь зразків-свідків визначимо річний економічний ефект E , грн., який у нашому випадку може бути досягнутий за рахунок скорочення часу механічної обробки:

$$E = (C_{OP}^{BA3} - C_{OP}^{PO3P})N. \quad (4.9)$$

$$E = (51,6 - 35,38)10000 = 162200 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.1 – Структура витрат по статтях технологічної собівартості, грн.

Стаття технологічної собівартості	Позначення	Базовий варіант	Розроблений варіант
Заробітна плата робітника за виконання однієї операції	Z_{OP}	20,71	11,44
Витрати на електроенергію	Z_{EH}	12,94	7,15
Витрати на різальний інструмент	Z_{PI}	1,2	0,64
Витрати на верстати пристосування	Z_{PP}	1,3	0,7
Амортизаційні відрахування від балансової вартості устаткування	Z_{AM}	0,75	0,75
Витрати з утримання устаткування	Z_{UTP}	1,0	1,0
Витрати на поточний ремонт устаткування	Z_{EM}	13,7	13,7
Загалом	C_{OP}	51,6	35,38

Аналіз даних таблиці 4.1 показує, що визначальну роль у формуванні технологічної собівартості відіграють витрати на:

- зарплату робітників;
- витрати на ремонт устаткування;
- витрати на електричну енергію.

4.3 Екологічна безпека

Процес алмазного накочування, як і більшість операцій механічної обробки, має певний вплив на навколишнє природне середовище. Основними потенційними

джерелами забруднення є відходи виробництва (використані мастильно-охолоджувальні рідини, стружка, абразивні залишки), споживання електроенергії, а також шум і вібрації, що виникають під час роботи обладнання.

На відміну від традиційних методів абразивної або шліфувальної обробки, алмазне накочування є процесом поверхневої пластичної деформації. Стружка не утворюється, знос інструмента мінімальний. Це забезпечує менше утворення твердих відходів та знижує рівень пилового забруднення повітря у цеху. Разом із тим для зниження тертя між інструментом та заготовкою широко застосовуються МОР. Їх неправильне зберігання або утилізація можуть бути джерелом хімічного забруднення.

Використані МОР містять домішки металів. Механічні частинки та продукти окислення, що при потраплянні до ґрунту або стічних вод можуть негативно вплинути на екосистеми. Для забезпечення екологічної безпеки рекомендується:

- використовувати екологічно безпечні емульсії на водній основі або біорозкладні мастильні матеріали;
- застосовувати замкнені системи циркуляції МОР, що дозволяють зменшити витрати рідини та зменшити кількість відходів;
- здійснювати регулярну фільтрацію та регенерацію МОР за допомогою відцентрових або мембранних систем очищення;
- збирати відпрацьовані рідини у спеціальні герметичні ємності та передавати їх на утилізацію відповідно до вимог ДСТУ 4462.3 – 2005 та чинного екологічного законодавства України.

Алмазне накочування відзначається низьким рівнем енергоспоживання порівняно із іншими методами зміцнювальної обробки (наприклад, термообробка), що позитивно впливає на енергоефективність виробництва. Для подальшого зменшення екологічного навантаження доцільно наступне:

- використовувати сучасні частотні перетворювачі для регулювання швидкості обертання шпинделя;
- впроваджувати енергоменеджмент відповідно до вимог ISO 50001:2020;
- своєчасно проводити технічне обслуговування верстатів для запобігання втрат енергії через тертя, вібрації.

Не зважаючи на те, що алмазне накочування є відносно малошумним процесом, тривала робота верстатів може створювати акустичні навантаження на персонал, доводячи. З метою зменшення шумового забруднення необхідно:

- встановлювати звукоізоляційні кожухи у зонах обробки;
- розміщувати верстати на вібропоглинаючих фундаментах;
- дотримуватися нормативних рівнів шуму відповідно до ДСН 3.3.6.037-99.

Під час експлуатації обладнання необхідно сортувати тверді відходи (металеві заливки, фільтрувальні матеріали, використані ганчірки), а також їх тимчасове зберігання у закритих контейнерах із подальшою передачею спеціалізованим підприємствам для переробки або утилізації.

Для контролю екологічного стану робочої зони необхідно здійснювати регулярний моніторинг повітря, рівня шуму, освітлення, концентрації аерозолів МОП. результати якого фіксувати у відповідних журналах.

Отже, забезпечення екологічної безпеки під час операції алмазного накочування повинно ґрунтуватися на принципах раціонального використання ресурсів, мінімізації відходів, зменшення шкідливих викидів, використання замкнених технологічних циклів. Комплексне впровадження зазначених заходів сприятиме підвищенню екологічної ефективності виробництва зменшенню його негативного впливу на довкілля, а також створить безпечні умови праці для персоналу.

Висновки до розділу 4

1. Забезпечення безпеки праці під час алмазного накочування вимагає суворого дотримання правил, правильного облаштування робочого місця, використання засобів індивідуального захисту та своєчасного технічного обслуговування обладнання. Виконання цих вимог гарантує надійність технологічного процесу й мінімізує ризики виробничого травматизму.

2. Техніко-економічні розрахунки показали, що застосування алмазного накочування дозволяє зменшити технологічну собівартість операції з 51,6 грн. до 35,28 грн. Економічний ефект становить 16,22 грн. на одиницю продукції. Річний

економічний ефект 162200 грн. на партії деталей у 10000 шт. Основними чинниками зниження витрат є скорочення часу обробки, зменшення енергоспоживання та підвищення довговічності інструменту.

З екологічної точки зору процес алмазного накочування має суттєві переваги над традиційними методами обробки:

- не супроводжується утворенням стружки;
- характеризується низьким рівнем шуму, вібрацій, енергоспоживання.

Виконання рекомендацій з утилізації мастильно-охолоджувальних рідин, впровадження замкнених систем очищення та енергозберігаючих технологій забезпечує відповідність процесу сучасним вимогам екологічної безпеки.

ВИСНОВКИ

Під час виконання роботи проведено дослідження процесу формування залишкових напружень у довгомірних валах зі сталі 40X після обробки методом алмазного накочування, що є одним із ефективних способів поверхневого пластичного деформування.

1. Проаналізовано фізичні (рентгенівські, ультразвукові, електромагнітні) та механічні (метод поздовжнього розпилювання, метод дисків, метод розточування) способи визначення залишкових напружень. Встановлено, що механічні методи забезпечують високу точність і простоту реалізації для циліндричних деталей. Виявлено, що залишкові напруження суттєво впливають на якість поверхневого шару – напруження стиску підвищують втомну міцність, зносостійкість і стабільність форми, тоді як напруження розтягу спричиняють викривлення й зниження експлуатаційної надійності.

2. Алмазне накочування є високоефективним методом поверхневого пластичного деформування. Воно поєднує функції чистої обробки та зміцнення. Процес відбувається без утворення стружки, сприяє формуванню залишкових напружень стиску, підвищенню мікротвердості, зменшенню шорсткості до $R_a = 0,05-0,08$ мкм. До переваг методу належать висока продуктивність, низьке енергоспоживання, можливість обробки маложорстких валів, тривалий ресурс інструменту.

3. Розроблено та впроваджено методика експериментального дослідження осьових, радіальних і тангенціальних залишкових напружень. Показано, що параметри технологічного процесу (зусилля притискування, швидкість накочування, кількість проходів) істотно впливають на величину залишкових напружень і мікротвердість поверхневого шару.

4. Експериментальні результати підтвердили, що застосування алмазного накочування забезпечує утворення сприятливих залишкових напружень стиску у поверхневих шарах матеріалу, підвищення мікротвердості до 30...40%, зменшення шорсткості поверхні $R_a = 0,05-0,08$ мкм, а також підвищення жорсткості та стабільності форми валів.

5. Зі збільшенням зусилля притискання до 150 Н і кількості проходів до 4 зростає рівень залишкових напружень стиску та глибина зміцненого шару. Зі збільшенням швидкості накочування понад 120 м/хв спостерігається зменшення ефекту зміцнення через зниження часу контакту інструмента з поверхнею. Оптимальними є режими: зусилля 100–120 Н, швидкість 60–90 м/хв, 2–3 проходи.

6. Рекомендовано застосовувати алмазне накочування на завершальній стадії обробки валів після точіння або шліфування для формування стискаючих напружень у поверхневому шарі. Використання інструментів із сферичною робочою частиною радіусом 1,5...3 мм і контроль зусилля притискання за допомогою тарованої пружини дозволяє мінімізувати згинальні деформації та підвищити загальну жорсткість деталей на 10...15%.

7. Розроблений процес відповідає вимогам охорони праці. Передбачено заходи з електробезпеки, вентиляції та контролю шуму. Техніко-економічний аналіз показав зниження собівартості обробки однієї деталі з 51,6 до 35,38 грн, що забезпечує економічний ефект 16,22 грн на одиницю. Алмазне накочування є екологічно безпечним процесом, оскільки не супроводжується утворенням стружки, має низьке енергоспоживання та мінімальну кількість відходів. Рекомендовано використання замкнених систем MOP та фільтрації для зменшення впливу на довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розенберг, А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания [Текст] / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – Київ: Наук. думка, 1990. – 320 с.
2. Titanium aluminides by hot isostatic pressing of cold extruded titanium-aluminium powder mixtures [Text] / M. Dahms, J. Seeger, W. Smarsly, B. Wildhag // ISIJ International. – 1991. – Vol. 31, No. 10. – P. 1093–1099.
3. Direct selective laser sintering of metals [Text] / M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow // Rapid prototyping journal. – 1995. – Vol. 1, Issue 1. – P. 26–36. DOI: 10.1108/13552549510078113.
4. Appel, F. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys [Text] / F. Appel, M. Oehring, R. Wagner // Intermetallics. – 2000. – Vol. 8. – P. 1283–1312.
5. Mantle, A. L. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide [Text] / A. L. Mantle, D. K. Aspinwall // Journal of materials processing technology. – 2001. – Vol. 118, Issues 1–3. – P. 142–150. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00914-1.
6. Jackson, M. J. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools [Text] / M. J. Jackson, N. Barlow, et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – Vol. 217. – P. 583–588.
7. Synthesis of alloy Ti-6Al-4V with low residual porosity by a powder metallurgy method [Text] / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakina, F. H. Froes et al. // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2002. – Vol. 41, No. 7-8. – P. 382–398. DOI:10.1023/A:1021117126537.
8. Rapidly solidified titanium aluminide-based composite deposits with dispersed nitride particles produced by reactive plasma spraying [Text] / Y. Hoshiyama et al. // Journal of the Japan Institute of Metals. – 2002. – Vol. 66. – P. 784–791.
9. Kumar, S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach [Text] / S. Kumar // The journal of the minerals, metals & materials society. – 2003. – Vol. 55, Issue 10. – P. 43–47.
10. The technologies of titanium powder metallurgy [Text] / F. H. Froes et al. // The journal of the minerals, metals & materials society. – 2004. – Vol. 56, Issue 11. – P. 46–48.

11. Orban, R. L. New research directions in powder metallurgy [Text] / R. L. Orban // Romanian reports in physics. – 2004. – Vol. 56, No. 3. – P. 505–516.
12. Refinement of Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Processed by Twist Extrusion and Subsequent Rolling [Text] / V. V. Stolyarov et al. // The physics of metals and metallography. – 2005. – Vol. 99, No. 2. – P. 204–211.
13. Ran, G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy [Text] / G. Ran, J. Zhou, Q. G. Wang // Journal of alloys and compounds. – 2006. – Vol. 421. – P. 80–86.
14. Грабченко, А. І. 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів і процесів шліфування [Текст]: навч. посіб. / А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харків : НТУ «ХП», 2006. – 364 с.
15. Lapovok, R. Low-temperature compaction of Ti–6Al–4V powder using equal channel angular extrusion with back pressure [Text] / R. Lapovok et al. // Materials science and engineering: A. – 2008. – Vol. 490, Issues 1–2. – P. 171–180.
16. Вишнепольський, Є. В. Підвищення опору втомі місць концентрації напружень у циліндричних оболочках алмазним вигладжуванням [Текст] / Є. В. Вишнепольський, Г. В. Пухальська, І. Л. Гліксон // Вісник двигунобудування. – 2009 – № 1. – С. 90–94.
17. Angelo, P. C. Powder metallurgy: science, technology and applications [Text] / P. C. Angelo, R. Srinamanian. – New Delhi : PHI Learning Private Limited, 2009. – 502 p.
18. Beygelzimer, Y. Vortices and mixing in metals during severe plastic deformation [Text] / Y. Beygelzimer // Materials science forum. – 2011. – Vol. 683. – P. 213–224.
19. Akkurt, A. Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel [Text] / A. Akkurt // Journal of materials engineering and performance. – 2011. – Vol. 20, Issue 6. – P. 960–968.
20. Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness [Text] / N. Luis et al. // Materials and manufacturing processes. – 2011. – Vol. 26, Issue 8. – P. 997–1003.
21. McCracken, C. G. Key characteristics of hydride-dehydride titanium powder [Text] / C. G. McCracken, D. P. Barbis, R. C. Deeter // Powder Metallurgy. – 2011. – Vol. 54, Issue 3. – P. 180–183.

22. Kothari, K. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques [Text] / K. Kothari, R. Radhakrishnan, N. M. Wereley // Progress in Aerospace Sciences. – 2012. – Vol. 54. – P. 1–16.

23. LExcellent, C. Shape-memory alloys handbook [Text] / C. LExcellent. – Hoboken: Wiley, 2013. – 408 p.

24. On high-speed turning of a third-generation gamma titanium aluminide [Text] / F. Klocke et al. // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 1–4. – P. 155–163.

25. Lin, W. S. Additive manufacturing technology (direct metal laser sintering) as a novel approach to fabricate functionally graded titanium implants [Text] / W. S. Lin et al. // The international journal of oral & maxillofacial implants. – 2013. – Vol. 28, No. 6. – P. 1490–1495.

26. Рязанова-Хитровская, Н. В. Исследование напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании [Текст] / Н. В. Рязанова-Хитровская, И. Н. Пыжов // Резание и инструменты технологических системах. – Харьков, 2013. – Вып. 86. – С. 151–159.

27. Дахнюк, О. П. Оцінка ефективності операцій механічного оброблення [Текст] / О. П. Дахнюк, В. Ю. Заблоцький, С. О. Приступа // Технологічні комплекси. – 2014. – № 1 (9). – С. 127–131.

28. Priarone, P. C. Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication [Text] / P. C. Priarone et al. // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 24. – P. 62–67.

29. Титов, А. В. Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов [Текст] / А. В. Титов, П. В. Шмелёва, Е. А. Кириенко, О. В. Герасимова // Обработка материалов давлением. – Краматорськ : ДРМА, 2015. – № 2 (41). – С. 81–86.

30. Дахнюк, О. П. Вплив технологічних методів оброблення на зносостійкість робочих поверхонь [Текст] // Матеріали II Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Приладобудування та метрологія». – Луцьк : Луцький НТУ, 2016. – С. 27–28.

31. Kikuchi, S. Effect of harmonic structure design with bi-modal grain size distribution on fatigue crack propagation in Ti–6Al–4V alloy [Text] / S. Kikuchi et al. // International journal of fatigue. – 2016. – Vol. 92. – P. 616–622.

32. Baudana, G. Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by electron beam melting [Text] / G. Baudana et al. // Metal powder report. – 2016. – Vol. 71, Issue 3. – P. 193–199.

33. Pollock, T. M. Alloy design for aircraft engines [Text] / T. M. Pollock // Nature materials. – 2016. – Vol. 15. – P. 809–815.

34. Веселовська, Н. Р. Контактна взаємодія інструмента з деталлю у процесах поверхневого пластичного деформування з ультразвуком [Текст] / Н. Р. Веселовська, В. В. Турлич, В. С. Руткевич // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. – № 2 (85). – С. 51–58.

35. Pavlenko, D. V. Assessment of gas saturation of titanium alloys synthesized from powders using twist extrusion [Text] / D. V. Pavlenko // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2017. – Vol. 56, Issue 5–6. – P. 273–282.

36. Kenel, C. Microstructure and oxide particle stability in a novel ODS γ -TiAl alloy [Text] / C. Kenel et al. // Intermetallics. – 2017. – Vol. 90. – P. 63–73.

37. Nazarova, M. N. Diagnostics and repair of centrifugal oil transfer pump rotor shaft [Text] / M. N. Nazarova, A. G. Palaev // IOP Conf. Series: Earth and environmental science. – 2017. – Vol. 87, Issue 9. – P. 1–7.

38. Belova, O. V. Prospects of application of additive technologies for increasing the efficiency of impeller machines [Text] / O. V. Belova, Yu. F. Borisov // IOP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1876. – P. 1–7.

39. Dahnyuk, O. Formation of physical and mechanical properties of surface layer of machine parts [Text] / O. Dahnyuk, V. Zabiotskiy, S. Prystupa, A. Tkachuk // Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. – 2017. – Vol. 8. – P. 7–19.

40. Bobrovskij, I. N. Furnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art [Text] / I. N. Bobrovskij // IOP Conf. Series: Materials science and engineering. – 2018. – Vol. 302. – P. 1–6.