

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
«магістр»

на тему: «Дослідження впливу вібраційно-зміцнюючої обробки на якість
сталевих деталей»

КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
спеціальності 133 Галузеве машино-
будування ступеня вищої освіти
«магістр» групи 133ГМмд_22
Цьова Владислав Володимирович

Керівник: проф. Горик О.В.

Полтава – 2023 року

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 5 розділів, 19 рисунків, 7 таблиць, 41 літературних джерел, 63 сторінок.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вібраційно-зміцнюючої обробки сталевих деталей.

Предметом дослідження є процес формування необхідних параметрів якості поверхневого шару деталей в результаті вібраційно-зміцнюючої обробки.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – є дослідження впливу основних параметрів на якість поверхонь сталевих деталей при вібраційно-зміцнюючій обробці.

Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра – розроблено закономірності проектування технологічних процесів, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей

У **першому розділі** розглянуті можливості застосування методів поверхнево-пластичного деформування та їх класифікація, приведений огляд робіт в області досліджень поверхнево-пластичного деформування.

У **другому розділі** проведено моделювання процесу взаємодії індентора з оброблюваною поверхнею деталі та приведено розрахунок основних параметрів зміцнення при вібраційній обробці.

У **третьому розділі** представлена загальна методика проведення експериментів, прилади та вимірювальна апаратура, що використовуються при дослідженнях, викладені методики досліджень та обробки експериментальних даних.

У **четвертому розділі** викладено результати експериментальних досліджень та перевірки відповідності теоретичних залежностей отриманим даним.

У **п'ятому розділі** розглянуті питання екологічної безпеки та запропоновані заходи з охорони праці та екологічної експертизи, зроблений аналіз техніко-економічного обґрунтування розробки.

Практичні результати роботи – отримані залежності визначення параметрів якості поверхневого шару деталей.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рекомендації щодо використання результатів роботи – використання запропонованого комплексу заходів при вібраційно-зміцнюючій обробці плоских деталей, може бути використане механічними майстернями при ремонті сільськогосподарської техніки.

Сфера застосування результатів роботи – агропромислове і машинобудівне виробництво.

Основні результати роботи обговорювалися на студентських наукових конференціях Полтавського державного аграрного університету.

Ілюстраційна частина кваліфікаційної роботи – 8 аркушів.

Результат перевірки тексту пояснювальної записки на плагіат за допомогою сервісу Unicheck: унікальність тексту – 95,89%.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена прикладним дослідженням впливу основних параметрів на критерії якості поверхонь деталей при вібраційно-зміцнюючій обробці.

ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, ВІБРАЦІЙНО-ЗМІЦНЮЮЧА, ОБРОБКА, ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ, ПЕРЕНАКЛЕП, ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР, ЕКОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to applied studies of the influence of the main parameters on the quality criteria of the surfaces of parts during vibration-strengthening processing.

HARDENING OF DETAILS, VIBRATION-STRENGTHENING PROCESSING, QUALITY PARAMETERS, PRE-GLUING, SURFACE LAYER, ECOLOGICAL EXPERTISE, LABOR PROTECTION.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

1	АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1	Аналіз методів обробки поверхнево-пластичним деформуванням	9
1.2	Вплив методів обробки поверхнево-пластичним деформуванням на властивості деталей	11
1.3	Аналіз наукових робіт поверхневого-пластичного деформування	19
1.4	Висновки до розділу	24
2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	26
2.1	Моделювання процесу взаємодії індентора з оброблюваною поверхнею деталі	26
2.2	Розрахунок основних параметрів зміцнення поверхневого шару сталеві деталі при вібраційно-зміцнюючій обробці.....	29
2.3	Висновки до розділу	34
3	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
3.1	Обладнання для проведення експериментальних досліджень	35
3.2	Пристрої та прилади для експериментальних досліджень	36
3.3	Зразки для проведення експериментальних досліджень	40
3.4	Методика вимірювання мікротвердості поверхневого шару	41
3.5	Методика дослідження явища перенаклепу поверхневого шару.....	42
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	43
4.1	Дослідження параметрів якості поверхневого шару при вібраційно-зміцнюючій обробці	43
4.2	Дослідження явища перенаклепу поверхневого шару деталей.....	47
5	РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
5.1	Розробка технологічних рекомендацій	49
5.2	Екологічна експертиза	51
5.3	Охорона праці. Правила безпеки при обробці деталей.....	52
5.4	Техніко-економічне обґрунтування розробки.....	56
	Список джерел посилання	60

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В машинобудуванні ставляться високі вимоги до якості та довговічності деталей, що виготовляються. Довговічність безпосередньо пов'язана із якісними характеристиками поверхневого шару. Також існує залежність експлуатаційних властивостей деталей від якості поверхневого шару.

Одним із перспективних способів, що використовуються на фінішних етапах обробки, є поверхнево-пластичне деформування. Сутність якого полягає в тому, що необхідні розміри та якісні характеристики поверхневого шару досягаються не зрізанням частини матеріалу, а його пластичною формозміною. У процесі деформування, одночасно з обробкою поверхні деталі, виробляється її зміцнення і, як наслідок, відбувається поліпшення експлуатаційних властивостей, що призводить до збільшення життєвого циклу деталей. Великий інтерес інженерів до цих методів пояснюється їх широкими технологічними можливостями та суттєвими техніко-економічними перевагами.

Труднощі, здатні виникнути в процесі обробки поверхнево пластичним деформуванням, в основному слід віднести до пошуку раціональних режимів обробки, тому що від раціональності призначення залежать не тільки збільшення міцності та довговічності деталей, але й досягнення необхідної якості поверхневого шару. Найчастіше параметри режимів обробки призначаються із результатів, отриманих емпіричним шляхом, що не завжди призводить до бажаного результату обробки. Тому в умовах сучасного виробництва, слід мати методику оптимізації зміцнювальної обробки, яка гарантує не тільки задану якість поверхневого шару, але і дозволяє забезпечити сприятливу картину залишкових напружень.

Метою роботи є дослідження впливу основних параметрів на якість поверхонь сталевих деталей при вібраційно-зміцнюючій обробці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути особливості впливу методів обробки поверхнево пластичним деформуванням на якість сталевих деталей;
- розробити теоретичні моделі формування глибини зміцнення та

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ступеня деформації поверхневого шару;

- провести експериментальні дослідження впливу основних параметрів на якість поверхонь деталей при вібраційно-зміцнюючій обробці;

- на основі отриманих результатів розробити рекомендації щодо практичної реалізації досліджень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вібраційно-зміцнюючої обробки сталевих деталей.

Предметом дослідження є процес формування необхідних параметрів якості поверхневого шару деталей в результаті вібраційно-зміцнюючої обробки.

Наукова новизна. Отримано залежності впливу режимів обробки, характеристик робочих середовищ та фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей на параметри якості поверхневого шару. Розроблено закономірності проектування технологічних процесів, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей.

Практична значущість роботи. Отримані залежності визначення параметрів якості поверхневого шару деталей. Розроблено методичку інженерних розрахунків раціональних параметрів технологічних процесів вібраційно-зміцнюючої обробки.

Теоретична значущість роботи полягає у створенні комплексу теоретичних моделей формування показників якості поверхневого шару, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей оброблених деталей.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз методів обробки поверхнево-пластичним деформуванням

Підвищення довговічності та надійності деталей машин завжди було і залишається одним із найважливіших завдань машинобудування. Для вирішення цього завдання в руках технологів є великий асортимент сучасних способів, серед яких особливу увагу займають методи поверхневого-пластичного деформування. Застосування методів поверхневого пластично деформування на фінішних етапах обробки деталей є дуже ефективним засобом підвищення їх характеристик міцності та експлуатаційних.

Активний розвиток методів поверхневого пластично деформування розпочався у середині 20 століття. Найбільший інтерес у галузі обробки поверхневим пластичним деформуванням становлять роботи багатьох вчених, що приведені в роботах [1-15].

В даний час розроблено та впроваджено у виробництво різні методи поверхневого пластично деформування та обладнання для їх реалізації.

Під поверхневого пластично-деформування розуміють процес обробки, при якому немає утворення стружки, а пластичне деформування тонкого поверхневого шару деталі супроводжується переміщенням (перерозподілом) матеріалу в результаті прикладених навантажень. При цьому відбувається зміна мікрогеометрії поверхні, фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей, що обробляються. Поверхня, оброблена методами поверхневого пластично деформування, має достатню твердість, що стискають залишкові напруження в поверхневому шарі, згладжені мікронерівності. Як показує накопичений досвід, правильно призначені режими поверхневого пластично деформування дозволяють збільшити довговічність деталі в 1,5-1,6 разів і більше, дозволяючи цим збільшити цикл життєдіяльності виробу. Розробка ефективних технологічних процесів поверхневого пластично деформування, сприяють підвищенню довговічності деталей, є найважливішим завданням підвищення ефективності виробництва.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Класифікація існуючих статичних методів поверхневого-пластичного деформування наведена у табл. 1.1 [18].

Таблиця 1.1 – Класифікація методів поверхневого-пластичного деформування

Статичні методи поверхнево- пластичного деформування	Поверхнєве доронування
	Вигладжування
	Обкатування
	Вібраційне накочування
	Вібраційне вигладжування
	Зміцнююче розкочування
Динамічні методи поверхнево- пластичного деформування	Дробоструминна
	Гідроробоструминна обробка
	Віброударна обробка
	Ротаційна обробка
	Карбування
	Обробка кульково-стрижневим зміцнювачем
	Віброконтактний наклеп
	Ударне накочування
	Ультразвукова обробка
	Обробка механічними щітками
Віброобкатування	
Вібровигладжування	

Широке поширення методи поверхневого пластично деформування набули завдяки своїй економічності та простоті реалізації. За характером навантаження, що додається, згідно ГОСТ 18296-72 [16], методи поверхневого-пластично деформування поділяють на статичні та динамічні. При обробці статичними методами поверхневого пластично деформування деформуючий інструмент або робочі середовища, впливають на поверхню оброблюваних деталей з постійним зусиллям, при цьому відбувається плавне переміщення інструменту і вогнища

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деформації під ним по всій поверхні деталі, що підлягає обробці. При динамічних методах поверхневого пластично-деформування робочі середовища, найчастіше у вигляді сталевих полірованих кульок, впливають на поверхню деталей, що обробляються багаторазовими ударами. При цьому сила зіткнень змінюється в кожному циклі від мінімального до максимального значення, а обробці може піддаватися вся поверхня деталі або її окремі ділянки при місцевому зміцненні або з переміщенням зони впливу послідовно по всій поверхні деталі [17].

1.2 Вплив методів обробки поверхнево-пластичним деформуванням на властивості деталей

При обробці динамічними методами поверхнево пластичного деформування в зоні контакту індентора з деталлю виникає осередок деформації (ОД), в якому проходять процеси течії металу. Технологічні параметри обробки впливають на форму та розмір ВД. Діяльність [18] йдеться у тому, що формування поверхневого шару відбувається у результаті переміщення частинок поверхневого шару в ОД.

У процесі обробки поверхнево пластичного деформування у зоні контакту індентора з поверхнею деталі розвивається високий тиск, під дією якого відбувається частковий розпад залишкового аустеніту. Залишковий аустеніт перетворюється на мартенсит. В результаті після обробки деталей методами поверхнево-пластичного деформування підвищується твердість поверхневого шару. Зважаючи на те, що мартенсит має більший питомий обсяг, порівняно з залишковим аустенітом, поверхневий шар оброблених деталей поверхневим пластичним деформуванням прагне збільшити свої розміри. Нижчі шари металу перешкоджають подібному зростанню. Тому в поверхневих шарах формуються залишкові напруження стиску, а в серцевині напруження розтягування.

Одночасно з процесом утворення стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі можливе утворення напружень розтягу, що є небажаним явищем. Зовнішній шар оброблюваного металу в процесі обробки схильний до нагрівання, при цьому поверхневий шар прагнути до подовження, більш

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

холодний внутрішній шар перешкоджає перебігу даного процесу. Під час наступного охолодження поверхневий шар прагнучиме стиснутись, але пружно напружений внутрішній шар перешкоджає стиску. В результаті, у поверхневому шарі можуть виникнути залишкові напруження розтягування, а у внутрішньому шарі – стискування.

Також у процесі обробки динамічними методами поверхнево пластичного деформування виникає ковзання в кристалах металу, яке зменшує структурні неоднорідності [19]. Усунення неоднорідностей частково відновлює реальну міцність кристалів та підвищує величину критичної напружень і зсуву. При цьому смуги ковзання ділять кристал на дрібні частинки у вигляді пластинок, перетворюючи його на полікристал, що складається з дрібних витягнутих зерен.

Обробка динамічними методами поверхнево пластичного деформування супроводжується підвищенням густини дислокацій. Зі збільшенням густини дислокацій зменшується відстань між ними, а це призводить до посилення взаємодії їх між собою. Опір руху дислокацій зростає, отже, зростає та опір деформації, тобто відбувається зміцнення металу. Основною причиною процесу зміцнення є стрімке зростання дислокацій, що зосереджуються поблизу зрушень.

Процес обробки деталей методами поверхнево-пластичного деформування супроводжується нагріванням деталі, інденторів та навколишнього середовища. Тепло утворюється в результаті пластичного деформування, процес характеризується миттєвим локальним нагріванням і швидким відведенням тепла всередину оброблюваної деталі. При цьому використання технологічної рідини дозволяє знизити температуру в зоні деформування і не допустити термічних дефектів [20].

При обробці динамічними методами поверхнево-пластичного деформування відбувається пластичне деформування поверхні деталей внаслідок багаторазової взаємодії з нею інденторів. Залежно від вихідного профілю відбувається утворення одиничних лунок з певною шорсткістю. В першу чергу індентори взаємодіють з виступами вихідної шорсткості, тому в процесі обробки спостерігається значна зміна висотних параметрів профілю та незначне крокових

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

параметрів. В результаті накладання та перетину одиничних слідів (лунок) інденторів з поверхнею деталі утворюється мікрорельєф поверхні [21].

Слід зазначити, що обробка методами поверхневого-пластичного деформування тонкого поверхневого шару має, порівняно з іншими фінішними методами обробки поверхні, ряд переваг [22]:

- у поверхневому шарі забезпечуються стискаючі залишкові напруження і відсутні концентратори напружень;
- відсутні термічні дефекти;
- у поверхневому шарі утворюється дрібнозерниста структура, зберігається цілісність волокон металу;
- забезпечується стабільна якість поверхні;
- при збереженні вихідної форми заготовлі забезпечується досягнення мінімальних висотних параметрів шорсткості оброблюваної поверхні деталі;
- мікронерівності набувають сприятливої форми з великою часткою опорної площі на рівні вершин нерівностей, утворюються регулярні мікрорельєфи з необхідними площею та топографією заглиблень для утримання мастильного матеріалу;
- забезпечується великий ступінь, товщина зміцнення поверхневого шару по всій площі деталі і при цьому межа між зміцненою та неукріпленою зонами має плавний перехід;
- знижений вміст аустеніту у структурі оброблених деталей;
- збільшення густини дислокацій.

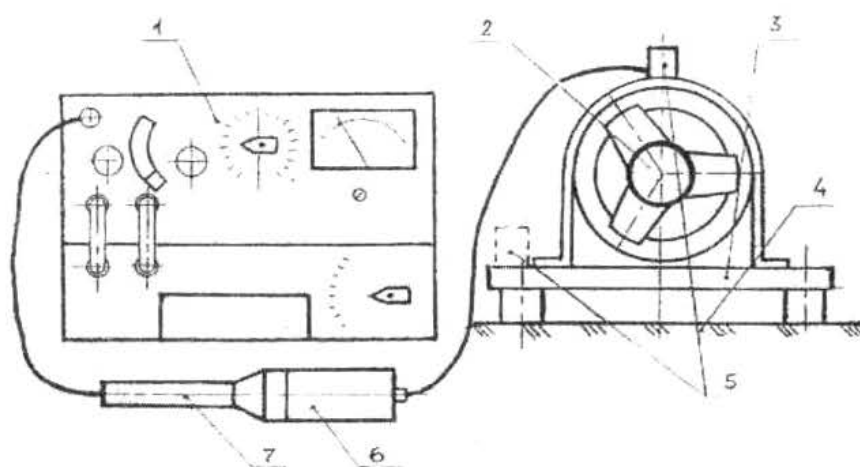
На відміну від статичних способів, обробка деталей динамічними методами поверхневого-пластичного деформування дозволяє енергетично вигідніше впливати на матеріал деталі, обробляти фасонні профілі, забезпечуючи при цьому необхідну точність та якість поверхневого шару за високої продуктивності.

Найбільш поширеними методами, що забезпечують раніше перелічені переваги і дозволяють обробляти фасонні деталі, є обробно-зміцнююча обробка дробом, вібраційно-зміцнююча обробка (ВЗО), відцентрово-ротаційна зміцнююча обробка (ВРЗО).

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вібраційна обробка являє собою процес передеформування та зменшення висоти мікронерівностей за рахунок ударного впливу частинок робочого середовища, що здійснюють разом з робочою камерою коливальні рухи [2]. У процесі обробки на поверхню деталі наноситься велика кількість мікроударів частинками робочого середовища, між якими відбуваються взаємні зіткнення та ковзання.

Схема верстата для вібраційної обробки представлена на рис. 1.1. Маса завантаження робочої камери є сумішшю робочого середовища та деталей у співвідношенні 3/1 – 5/1.



1 - робоча камера; 2 - пружний елемент; 3 - дебалансний вібратор; 4 - основа; 5 - шланги для подачі та зливу технологічної рідини; 6 - помпа; 7 - бак відстійник

Рисунок 1.1 – Схема установки для вібраційної обробки

Деталі при ВЗО можуть оброблятися у закріпленому положенні або при вільному завантаженні. У першому випадку обробка відбувається найбільш інтенсивно, зіткнення частинок середовища з поверхнею деталі відбуваються під одним кутом, що залежить від режимів обробки. У другому випадку зіткнення частинок робочого середовища та деталей має випадковий характер при хаотичному русі деталей усередині робочої камери, що сприяє рівномірності обробки деталей складної конфігурації, а також однакової обробці всіх деталей маси завантаження. У процесі обробки заготовка здатна займати різні положення в робочому середовищі.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робоча камера змонтована на пружних елементах (як пружні елементи можуть використовуватися пружини стиску або гвинтові пружини, а також пластинчасті ресори) і має можливість коливатися в різних напрямках. Вібрація робочої камери повідомляється від інерційного вібратора у вигляді валу, що обертається з незбалансованими вантажами з частотою 15-50 Гц і амплітудою 0,5-2,5 мм. У процесі обробки та заготівлі та робоче середовище постійно піддаються змінним за знаком прискорень, приходять в інтенсивне відносне переміщення, здійснюючи два види рухів: коливання та повільне переміщення всієї маси (циркуляційний рух). Вібрація передається від стінок робочої камери прилеглим шарам робочого середовища, які передають наступним шарам.

Необхідно відзначити, що дещо ефективніше обробка біля дна робочої камери, тому що тут створюється зона з максимальним тиском частинок робочого середовища. Слід враховувати, що зі збільшенням відстані від стінок робочої камери, енергія коливань частинок робочого середовища зменшується, а, отже, інтенсивність зміцнення зменшується. Процес одночасного впливу на оброблювану деталь великої кількості мікроударів у різних напрямках сприяє утриманню її у зваженому стані, виключаючи грубі вибоїни та пошкодження. У процесі обробки робочу камеру подається періодично або безперервно технологічна рідина (ТР) необхідного хімічного складу.

На інтенсивність ВЗО впливає режим коливань, параметри частинок робочого середовища, тривалість обробки, об'єм камери та ступінь її заповнення, механічні властивості матеріалу оброблюваних деталей та ін.

Вібраційно-зміцнююча обробка можна назвати універсальним методом обробки. Однією з основних її переваг є обробка деталей складної форми, а також здатність обробляти велику кількість деталей одночасно.

Вібраційно-зміцнювальна обробка дозволяє отримати шорсткість поверхні Ra до 0,12 мкм, зміцнений шар досягає глибини до 500 мкм, ступінь зміцнення до 20%, залишкові стискаючі напруження 100-150 МПа на глибині до 1 мм, знизити або усунути концентр. ВЗО дозволяє сформувати дрібнодисперсну структуру з високою щільністю дислокацій, значно знизити вміст залишкового аустеніту за

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рахунок його перетворення на структуру мартенситу.

Всі перераховані вище фактори вказують на те, що ВЗО дозволяє поліпшити експлуатаційні властивості оброблюваних деталей і, як наслідок, збільшити їх цикл життєдіяльності.

Іншим, не менш ефективним методом динамічного деформування, є відцентрово-ротаційна обробка серед сталених кульок.

ВРО займає особливе місце серед відомих методів поверх ново пластичного деформування, тому що дозволяє забезпечити найбільшу продуктивність процесу обробки, що значно перевищує продуктивність багатьох інших методів.

При ВРО маса завантаження, що складається з частинок робочого середовища 3 і оброблюваних деталей 4, завантажується в робочу камеру у вигляді циліндричного контейнера 1, розташованого вертикально і має дно, що обертається 2 у формі тарелі, при обертанні якого маса завантаження набуває форми тора (рис. 1.2) [17].

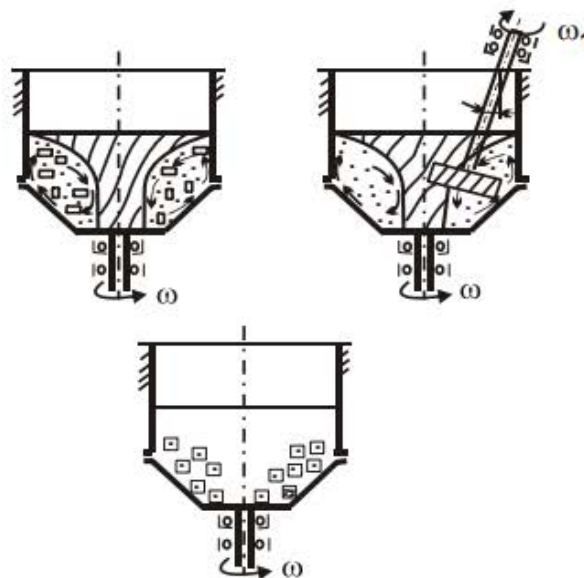


Рис. 1.2 – Схема процесу відцентрово-ротаційної обробки

Така конструкція верстата дозволяє забезпечити тороїдально-гвинтовий потік, який сприяє інтенсивній обробці деталей.

Основними перевагами відцентрово ротаційної обробки є: висока інтенсивність обробки; простота конструкції обладнання, можливість обробки заготовок «навал» великими партіями.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

У процесі ВРО, внаслідок впливу безлічі мікроударів частинок робочого середовища про поверхню оброблюваних заготовок створює передумови зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей.

На величину шорсткості обробленої поверхні при ВРВ впливає характеристика робочого середовища, режими обробки, обсяг завантаження робочої камери, фізико-механічні властивості поверхневого шару деталей. Зважаючи на те, що ЦРО є низькотемпературним процесом, у поверхневому шарі забезпечується сприятлива картина залишкових напружень.

У роботах [23, 24] представлено велику кількість факторів, які впливають на продуктивність і якість обробки, але більшість дослідників виділяють такі основні: властивості оброблюваного матеріалу, вихідний стан поверхні заготовок, кутова швидкість обертання ω dna, кут конусності dna, параметри робочого середовища (діаметри кульок), ступінь заповнення робочої камери, тривалість обробки, наявність та властивості технологічної рідини та ін.

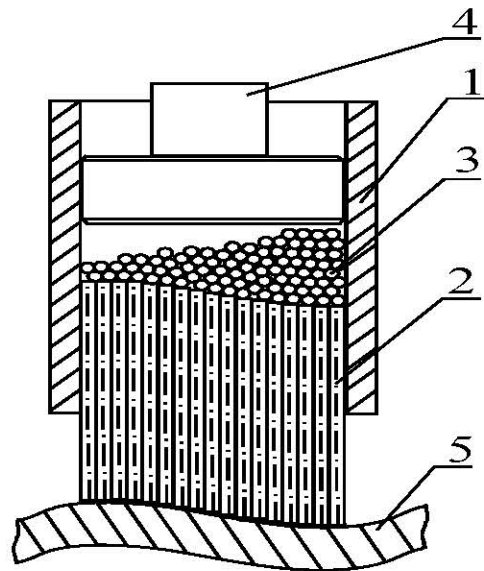
Як показують численні дослідження, ВРО дозволяє отримати шорсткість обробленої поверхні R_a до 0,8 мкм, забезпечити сприятливу картину стискаючі залишкові напруження величиною 100-150 МПа на глибині до 1 мм і, відповідно, підвищення втомної міцності і довговічності оброблюваних деталей в 1,5- 1,6 разів, а також ступінь зміцнення до 20%.

Ще одним ефективним методом обробки ППД є обробка кульково-стрижневим зміцнювачем. Кульково-стрижневий зміцнювач (КСЗ) є багато контактним віброударним інструментом для обробки поверхонь деталей методом поверхнево пластичного деформування. Даний вид обробки включає ряд переваг. КСЗ дозволяє забезпечити поєднання можливостей обробки фасонних поверхонь деталей, властивих ВЗО, та значну інтенсивність впливу на поверхню деталі властиву способу карбування [25].

Конструктивно пристрій складається з двох частин: приводу, що забезпечує енергію ударних імпульсів та складного обробного інструменту. В якості приводу використовуються стандартні пневмо-молотки різної потужності.

Конструкція зміцнювача представлена на рис. 1.3.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



1 - корпус; 2- упаковка сталевих стержнів; 3- сталеві кулі; 4- ударник; 5- деталь

Рисунок 1.3 – Схема багато контактного віброударного інструменту КСЗ

Кульково-стрижневий зміцнювач є багато контактним віброударним інструментом, в якому використовується передача ударного імпульсу, створюваного масивним ударником потужного пневмо молотка, що проходить через кілька шарів сталевих загартованих полірованих кульок, сукупності сталевих циліндричних стержнів, що мають сферичну заточку, які безпосередньо стикаються з оброблюваною.

Багатошаровий обсяг кульок, що володіє властивостями псевдо-текучості, може змінювати свою конфігурацію і дозволяє сукупності стержнів приймати форму оброблюваної деталі, в яку вони упираються без втрат енергії ударних імпульсів.

В результаті цього КСЗ, копіюючи при обробці форму складної поверхні деталі, може застосовуватися для зміцнення майже плоских, так і фасонних поверхонь з невеликим перепадом висот. При цьому, враховуючи значну потужність ударника пневмо молотка, можна отримувати зміцнення поверхневого шару, створювати сприятливі стискаючі залишкові напруження, згладжувати дрібні дефекти типу каверн, а також при певному поєднанні подачі і діаметра стержнів створювати на оброблювану поверхню регулярний або частково регулярний мікрорельєф.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз експериментальних даних, отриманих в результаті багаторічних досліджень представлених динамічних методів деформування, говорить про те, що ВЗО, ВРЗО та обробка КСЗ дозволяють забезпечити високі показники якості поверхневого шару оброблюваних деталей. Отримана в процесі обробки сприятлива картина стискаючих залишкових напружень, а також показники шорсткості поверхні, глибини зміцненого шару та ступеня деформації, позитивно впливають на довговічність і, як наслідок, цикл життєдіяльності виробів.

1.3 Аналіз наукових робіт поверхневого-пластичного деформування

Як зазначалося раніше, в сучасному машинобудуванні динамічні методи деформування набули широкого застосування в галузі підвищення експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей. Обробка даними методами дозволяє, при порівняно низьких виробничих витратах, кілька разів підвищити опір втоми, зносостійкість, контактну жорсткість і цим вплинути збільшення циклу життєдіяльності деталей. Результат зміцнення насамперед обумовлений збільшенням несучої здатності поверхневого шару оброблюваних деталей рахунок формування у ньому сприятливої картини стискаючих залишкових напружень, збільшення мікротвердості і глибини зміцненого шару.

Розглянемо основні наукові роботи у цьому напрямі.

Серед перших основних робіт з розкриття фізичної сутності технологічних процесів вібраційної обробки слід виділити праці [22-24]. Автором були проведені дослідження швидкості, сил зіткнення частинок робочого середовища та оброблюваних деталей, контактних напружень і температури в зоні зіткнення, параметрів одиничної взаємодії робочого середовища та оброблюваної поверхні, шорсткості поверхні та глибини зміцненого шару, отримані рівняння для розрахунку не якихось параметрів процесу.

Дослідження у галузі ударних методів пластичного деформування, що сприяють зміцненню поверхневого шару, було проведено Кудрявцевим. Автором запропонована залежність для визначення глибини наклепаного шару для випадку

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки серед сталевих кульок:

$$a = 3rk, \quad (1.1)$$

де r - радіус пластичного відбитка індентора (у разі еліптичної форми відбитка він приймається рівним: $\sqrt{a_1 b_1}$, де a_1 і b_1 півосі еліпса),

k - коефіцієнт, що залежить від ступеня наклепу.

Також автором отримано залежність для визначення ступеня деформації:

$$\varepsilon = \frac{r}{R_1}, \quad (1.2)$$

де R_1 - радіус кульки, що вдавлюється.

Встановлено залежність глибини наклепу від діаметра відбитка:

$$a = 1,5d, \quad (1.3)$$

Глибина наклепаного шару визначається залежно (у разі багаторазового динамічного вдавлювання):

$$a_0 = a \cdot \left(1,54 - \frac{HB}{1000} \right), \quad (1.4)$$

де HB - твердість матеріалу за Брінеллем.

$$HB = \frac{P}{\pi D h}, \quad (1.5)$$

де a - глибина деформованого шару при одноразовому динамічному вдавлюванні кульки-пуансону:

У роботі [30], присвячених розробці технологічних основ оптимізації процесів оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей в гранульованих робочих середовищах, наведено узагальнені теоретичні моделі методів обробки, що дозволяють розраховувати параметри якості поверхневого шару з урахуванням режимів обробки і характеристик робочих середовищ при вирішенні різних технологічних завдань, що дозволяє визначити глибину впровадження частки середовища (найчастіше металевої кульки):

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{\varphi} \cdot R'' \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\varphi}}{3k_s \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (1.6)$$

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де V_{ef} - ефективна швидкість частки (визначається особливостями конкретного виду обробки);

R^n - радіус частки;

α - кут зустрічі частинки з поверхнею деталі;

ρ_q - щільність матеріалу частинки;

k_s - коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості деталі;

c - коефіцієнт несучої здатності контактної поверхні;

σ_T - межа текучості матеріалу деталі.

Подана залежність неповно відображає процеси, що відбуваються під час обробки оздоблювально-зміцнюючими методами поверхневому шарі деталі. Автор не враховує параметри плями контакту, утвореного в результаті взаємодії кульки та поверхні оброблюваної деталі.

Також автором [31] запропоновано залежність для розрахунку середнього арифметичного відхилення шорсткості, що встановилася, при оздоблювально-зміцнювальній обробці в гранульованих робочих середовищах:

$$R_{a_{уст}} = k_R \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{\odot}}{R^2}}, \quad (1.7)$$

де l_{\odot} - базова довжина;

k_R - емпіричний коефіцієнт.

Подана теорія формування шорсткості поверхні оброблюваних деталей розроблена досить повно і буде використана при подальших дослідженнях.

Також у роботі розглянуто взаємодію абразивних гранул різної зернистості з оброблюваною поверхнею. Подано залежність для розрахунку об'єму металу, віддаленого при одиничній взаємодії:

$$V = 15,5 \cdot k_c \cdot \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \cdot \left(k_m^{0.5} \cdot V_0 \cdot \sin \beta \cdot \sqrt{\frac{\rho_q}{3 \cdot c \cdot \sigma_T}} \right)^{5/2} \cdot (\operatorname{ctg} \beta - f) \quad (1.8)$$

де k_c - коефіцієнт стружкоутворення;

R - радіус описаного кола частинки робочого середовища;

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

k_R - коефіцієнт, що враховує вплив зернистості абразивної частинки на фактичну площу контакту;

k_m - коефіцієнт, що враховує вплив сусідніх частинок при обробці;

V_0 - швидкість руху частки робочого середовища;

β - кут взаємодії частки робочого середовища та поверхні оброблюваної деталі;

f – коефіцієнт тертя.

Необхідно відзначити, що в роботі Горика О.В. представлена залежність для визначення обсягу лише за умови, що кут зустрічі з поверхнею деталі для обробки вільним абразивом не перевищує 65° . Для подальших досліджень процесу одиначної взаємодії частинок робочого середовища з поверхнею деталі було б доцільним розглянути випадки за інших кутів взаємодії.

Автором [31] був проведений великий обсяг робіт з визначення параметрів якості поверхневого шару, проте автором не було враховано вплив граничної деформації на досліджувані параметри.

У роботах [32] було проведено дослідження глибини зміцненого шару та залишкової напруженості. Виявлено, що обробка ВЗО дозволяє забезпечити збільшення мікротвердості поверхневого шару оброблюваних деталей на 20-35% при глибині 20-450 мкм, утворення дрібнодисперсних структур, формування сприятливої величини стискаючих залишкових напружень, величина яких може досягати до 50 - 80% межі течії. . Відзначено також, що пластична деформація поверхневого шару сприяє зменшенню шорсткості, зниження коефіцієнта тертя та збільшення опорної поверхні.

Автори [33], для визначення залишкових напружень, використовують експериментальні методи визначення напруження, які є дуже витратними, трудомісткими, що вимагають високої кваліфікації працівників. Не викликає сумнівів те, що отримання закономірностей для розрахунку залишкових напружень поверхневого шару та їх розподіл за його товщиною є важливим науковим завданням.

Робота [34] присвячена підвищенню ефективності відцентрово-ротаційної

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оздоблювальню-зміцнювальнююю обробки.

Представлена класифікація представляє великий інтерес, тому що для деяких матеріалів може здійснюватися перехід з однієї групи матеріалів до іншої залежно від структурного стану, числа навантажень, величини амплітуди напруження або деформації і т.д.

На думку автора [25], один і той же матеріал залежно від структурного стану, отриманого в результаті термообробки, може бути зміцнюваним (після відпалу - доевтектоїдна сталь - ферит, перліт; евтектоїдна сталь - перліт; заевтектоїдна сталь - перліт і цементит), роззміцнюючим (після загартування з низькою відпусткою - доевтектоїдна сталь - мартенсит, залишковий аустеніт; евтектоїдна сталь - мартенсит, залишковий аустеніт; заевтектоїдна сталь - мартенсит, залишковий аустеніт, вторинний цементит) і циклічно стабільний.

Незважаючи на великий об'єм виконаної роботи, автор [26], у наведених залежностях для визначення глибини та ступеня зміцнення, не враховує впливу параметрів обробки та ряду параметрів фізико-механічних властивостей матеріалу деталі на зумовлені величини, дані залежності вимагають подальшого уточнення.

У своїй роботі [17] наводить ряд експериментальних досліджень, спрямованих на визначення знака, величини та глибини залягання залишкової напруження при обробці деталей КСЗ. Встановлено, що величина стискаючих залишкових напружень, що формуються в поверхневому шарі оброблених деталей, приблизно дорівнює напруженням, отриманим при ВЗО, але при цьому глибина їх залягання приблизно в 2 рази більше.

Автором [18] були отримані залежності для прогнозування параметрів шорсткості поверхні, глибини та ступеня зміцнення при обробці КСЗ.

Для оцінки ефективності технологічних режимів обробки деталей статичними методами пластичного деформування авторами використовується величина інтенсивності контактної пружно-пластичної деформації ϵ_c . Інтенсивність деформації, будучи однією з характеристик об'ємного напружено-деформованого стану матеріалу в зоні локального контакту тіл, дозволяє оцінити

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

фізичний стан матеріалу, що деформується і, зокрема, визначити довговічність деталі [27]. При пружно-пластичному контактному деформуванні (обкатка валів тороїдальними роликами або кулькам) інтенсивність деформації, як встановлено в роботах [26, 27], є одним з головних факторів, що визначають ефективність зміцнення.

Оптимальним режимом поверхневого пластичного деформування, що проводиться з метою підвищення експлуатаційних властивостей оброблених деталей, буде такий, який дозволяє отримати максимальне збільшення межі витривалості деталі.

У процесі обробки деталі відбувається формування параметрів якості поверхневого шару, в процесі якого з одного боку відбуваються процеси фізичного зміцнення (наклепу), а з іншого боку йде процес розміцнення.

Виходячи з вищевикладеного, цікавий проведення досліджень з максимального використання резервів фізичного зміцнення матеріалу деталей при динамічних методах пластичного деформування.

В результаті аналізу вищенаведених джерел, можна зробити висновок, що подальше широке використання динамічних методів пластичного деформування та їх застосування в промисловості зустрічає певні труднощі, виникає необхідність всебічного вивчення механізму формування параметрів якості поверхневого шару та уточнення низки закономірностей впливу режимів обробки та характеристик робочих середовищ на їхню величину. Очевидно, що проектування технологічних процесів динамічних методів пластичного деформування вимагає розробки методики оптимізації технологічних режимів та характеристик робочих середовищ з метою отримання найкращих експлуатаційних характеристик оброблених деталей. Слід зазначити, що у дослідженнях, проведених раніше, оптимізація технологічних процесів здійснювалася за критерієм трудомісткості.

1.4 Висновки до розділу

Аналіз вище наведених результатів дослідження процесів динамічних методів поверхнево пластичного деформування, можна сформулювати мету та

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдання досліджень.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності вібраційно-зміцнюючої обробки сталевих деталей на основі дослідження формування характеристик поверхневого шару деталей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути особливості впливу методів обробки поверхнево пластичним деформуванням на підвищення властивостей деталей.
- розробити теоретичні моделі формування глибини зміцнення та ступеня деформації поверхневого шару;
- провести експериментальні дослідження впливу основних параметрів на критерії якості поверхонь деталей при вібраційно-зміцнюючій обробці;
- розробити практичні рекомендації щодо зміцнення матеріалу деталей.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Моделювання процесу взаємодії індентора з оброблюваною поверхнею деталі

Як зазначалося раніше, динамічні методи ППД дозволяють забезпечити необхідний набір експлуатаційних властивостей завдяки створенню відповідних значень параметрів якості поверхневого шару. Для того щоб досягти необхідних значень цих параметрів, необхідно розробити методичку аналітичного розрахунку критеріїв зміцнення (ступінь деформації та глибина зміцнення) та шорсткості поверхні.

Обробка динамічними методами ППД супроводжується нанесенням великої кількості ударів частинок робочого середовища поверхню деталі. Удар – складне фізичне явище, у якому відбувається короткочасне взаємодія тіл, що супроводжується перерозподілом кінетичної енергії.

Процес удару можна поділити на два етапи. На першому етапі відбувається деформація двох тіл, що взаємодіють, в зоні їх контакту доти, доки нормальна складова відносно швидкості не звернеться в 0. При цьому відбувається перехід кінетичної енергії в потенційну енергію деформованих тіл.

Другий етап супроводжується відновленням тіл у точці контакту. Одночасно відбувається перехід внутрішньої енергії тіл до кінетичної. Кінетична енергія, порівняно з первісним значенням, частково відновлюється. Одна частина енергії йде на відновлення залишкової вм'ятини та нагрівання тіл. У той час, коли тіла відокремлюються одне від одного, явище удару завершується.

Процес одиничного взаємодії при зміцнюючою обробці привернув увагу багатьох авторів, оскільки може бути покладено основою методички розрахунку оптимальних технологічних процесів обробки динамічними методами ППД [15]. Проте слід зазначити, більшість авторів аналізують процес одиничного взаємодії частинок обробної середовища з поверхню деталі при нормальному зіткненні. У той же час, аналіз робіт [2, 25] дозволяє зробити висновок, що зіткнення частинок робочого середовища з поверхнею деталі відбувається під різними кутами. Тому

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

при моделюванні процесу одиничної взаємодії для технологічних процесів слід розглядати косі зіткнення під різними кутами. Моделювання процесів взаємодії кульки з поверхнею деталі будемо проводити на підставі результатів робіт [2, 33].

На підставі аналізу робіт можна зробити висновок, що слід одиничного взаємодії кульки з поверхнею деталі буде лункою певної глибини у формі еліпса з великою і малою півосями a і b відповідно. Зазвичай еліптичний відбиток витягується у напрямку швидкості руху деталі, велика піввісь відбитка a буде розташована саме в цьому напрямку (рис. 2.1).

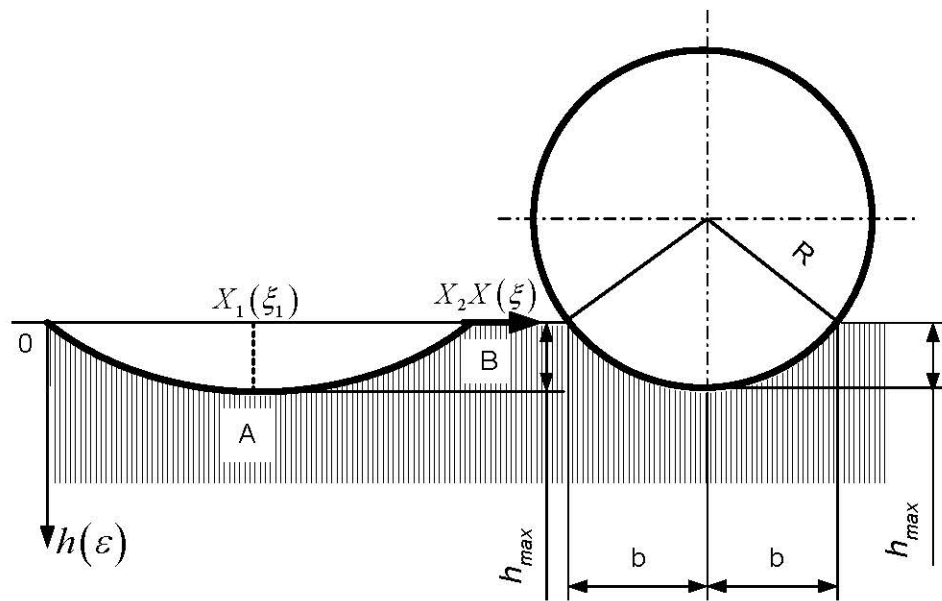


Рисунок 2.1 – Схема формування сліду одиничного взаємодії

Відповідно до прийнятої методики, зробимо такі припущення: нехай сталеві полірована кулька радіусу співпадає з поверхнею деталі під кутом α зі швидкістю V_0 , що дозволяє забезпечити достатнє зусилля для формування пластичного відбитка.

Скориставшись основними положеннями теорії ковзання жорсткої сфери по напівпростору, що пластично деформується [12] можна розрахувати локальний об'єм металу, деформований по шляху ковзання dx :

$$dV = \frac{V_0}{l} \cdot dx, \quad (2.1)$$

де V_0 - деформований обсяг, що припадає в кожний момент часу на одну

кульку:

$$V_0 = \pi \cdot R \cdot h^2, \quad (2.2)$$

l – середній діаметр плями контакту:

$$l = 2 \cdot \sqrt{R \cdot h}, \quad (2.3)$$

де h – глибина застосування кульки.

Тоді

$$dV = \frac{\pi \cdot R \cdot h^2}{2 \cdot \sqrt{R \cdot h}} \cdot dx, \quad (2.4)$$

$$dV = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{R} \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot dx. \quad (2.5)$$

Інтегруючи шляхом ковзання кульки, отримаємо:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{R} \cdot \int_0^{x^*} h^{\frac{3}{2}} \cdot dx. \quad (2.6)$$

Для визначення меж інтегрування вводимо безрозмірні координати:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}}, \quad (2.7)$$

$$\xi = \frac{x}{h_{\max}}, \quad (2.8)$$

де h_{\max} - максимальна глибина застосування індентора.

Введення безрозмірних координат дозволяє отримати:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{R} \cdot h_{\max}^{\frac{5}{2}} \cdot \int_0^{\varepsilon^*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \cdot d\xi. \quad (2.9)$$

На підставі результатів попередніх досліджень [18-25], можна зробити висновок, що слід одиничного взаємодії на вигляді зверху матиме форму еліпса розмірами великої та малої півосей. Величина малої півосі може бути визначена із схеми формування сліду одиничної взаємодії (рис. 2.1):

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2} \quad (2.10)$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) \cdot h_{\max} + b \quad (2.11)$$

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, величину півосей еліптичного відбитка можна визначити за формулами (2.10) та (2.11), а величину максимальної глибини відбитка можна розрахувати, використовуючи залежності:

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{ef} \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}}$$

2.2 Розрахунок основних параметрів зміцнення поверхневого шару сталеві деталі при вібраційно-зміцнюючій обробці

Основним завданням технологів є виготовлення конкурентоспроможного виробу, з необхідним набором якісних характеристик, здатного довгий час виконувати своє функціональне призначення без поточного та капітального ремонтів. Застосування вібраційно-зміцнюючої обробки на фінішних етапах обробки деталей є дуже ефективним засобом, що дозволяє забезпечити зміцнення поверхневого шару, мінімальну шорсткість поверхні, рівномірну дрібнозернисту структуру, сприятливу картину розподілу стискаючих залишкових напружень, не перерізаючи при цьому волокон металу. Такі значення параметрів якості поверхневого шару дозволяють отримати підвищення експлуатаційних властивостей оброблених деталей (зносостійкості, контактної жорсткості, корозійної стійкості та втомної довговічності).

При проектуванні технологічних процесів обробно-зміцнювальної обробки, одним з основних завдань є аналітичний розрахунок очікуваного ступеня деформації, глибини зміцненого шару та шорсткості поверхні. При впровадженні кульки в поверхню деталі в зоні контакту виникає залишкова вм'ятинка (пластичний відбиток) навколо якої завжди є пластично деформована область, що розповсюджується на деяку глибину h_n . Розрахунок глибини зміцненого шару та ступеня зміцнення в залежності від технологічних параметрів процесу обробки, являє собою складне завдання. Відомі технологічні залежності, представлені у відомих роботах, отримані з урахуванням численних припущень. Одна з перших спроб розрахункового визначення h_n , представлена у [27]:

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_n = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \quad (2.12)$$

де P - контактне навантаження.

При моделюванні взаємодії сферичного індентора з плоскою поверхнею отримано узагальнюючу залежність. Ця модель визначає вплив розмірів площі контакту сфери з площиною на глибину зміцненого шару h_n [27]:

$$h_n = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 0,5\left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (2.13)$$

де d - діаметр контактної майданчика індентора з деталлю.

У роботі [34] була отримана уточнена і придатна для прогнозування результатів обробки залежність, яка враховує, що в більшості випадків площа контакту сферичного індентора з площиною є еліпсною:

$$h_n = K \cdot \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 1,42 \cdot a \cdot b}, \quad (2.14)$$

де K - коефіцієнт, що враховує вплив форми плями контакту.

Застосування представлених раніше залежностей, що дозволяють визначити глибину проникнення пластичної деформації h_n вимагає знання таких величин, як контактне навантаження P і зусилля зіткнення. Однак, у деяких випадках, особливо при динамічних методах обробки, визначення цих величин становить значні труднощі. h_n бажано здійснювати через параметри, які легко обчислити чи визначити із дослідів. При виведенні теоретичних залежностей для визначення глибини зміцненого шару та ступеня деформації враховувалася умова пластичності Генки-Мізеса, за якої $\sigma_i = \sigma_T$, де σ_i - інтенсивність напружень.

У роботі [27] вираз (2.14) перетворено на вигляд:

$$h_n = 2,5 \cdot K \cdot \sqrt{D_{ш} \cdot h_{\max}}, \quad (2.15)$$

де $D_{ш}$ - діаметр кульки;

Також у роботі [27] наведено залежність визначення коефіцієнта K :

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4, \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.11); (2.12) та (2.13), можна записати для вібраційно-зміцнюючої обробки:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{V_{\text{эф}} \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (2.17)$$

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{V_{\text{эф}} \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}. \quad (2.18)$$

Розрахунок параметрів пластичного відбитка при зіткненні сферичного індентора з поверхнею деталі докладно описаний у роботах [31-33]. Для визначення діаметра пластичного відбитка автором запропоновано наступну залежність:

$$d = \left(\frac{D_{\text{шн}} \cdot E_{\text{ш}}}{0,1 \cdot HD} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.19)$$

де $E_{\text{ш}}$ - енергія удару індентору;

HD - динамічна твердість матеріалу деталі.

$$E_{\text{ш}} = \frac{E_y}{N} \cdot \eta, \quad (2.20)$$

де η - коефіцієнт корисної дії пристрою, що залежить від втрат енергії.

У роботі [28] представлена залежність визначення динамічної твердості з урахуванням твердості матеріалу за Брінеллем. Насправді досить часто вдаються до перерахунку одних чисел твердості до інших. Дані перерахунки здійснюються виключно на основі емпіричних залежностей, які не повністю описують внутрішні зв'язки між різними числами твердості. У роботі [33] автор пропонує використовувати одну з найбільш часто використовуваних залежностей для перекладу твердості за Брінеллем в динамічну твердість:

$$HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}. \quad (2.21)$$

Максимальну глибину застосування індентора при зміцнюючій обробці

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можна визначити за залежністю, запропонованою в роботі [14]:

$$h_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{0,1 \cdot N \cdot HD \cdot D_{ин}}} \quad (2.22)$$

З урахуванням приведених формул глибина зміцненого шару визначається за залежністю (при обробці КСЗ значення пів вісі відбитка a і b рівні між собою):

$$h_n = 1,68 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta \cdot D_{ин}}{N \cdot HB^{1,12} \cdot 10^6}} \quad (2.23)$$

На підставі результатів роботи [32], ступінь деформації ε можна розрахувати залежністю:

$$\varepsilon = \frac{d}{D}, \quad (2.24)$$

де d – діаметр що залишається від вдавлювання лунки;

D - діаметр індентора.

Тоді, з урахуванням результатів роботи [33], отримаємо залежність:

$$d = \left(\frac{D \cdot E_y}{0,1 \cdot HD} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.25)$$

Для динамічних методів ППД серед металевих кульок:

$$E_y = \frac{m_{ин} \cdot V_{эф}^2}{2}, \quad (2.26)$$

Враховуючи (2.19) та (20), після перетворень отримаємо наступну залежність для динамічних методів ППД у середовищі металевих кульок:

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{V_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ин}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}} \quad (2.27)$$

Також з робіт [20, 31] відомо, що при багаторазовому динамічному впливі на поверхню оброблюваної деталі, ступінь деформації зростає від 2 до 6 разів.

Для обробки КСЗ, з урахуванням приведених формул, ступінь деформації визначається за залежністю:

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon = 0,67 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{N \cdot HB^{12} \cdot R_{ин}^3 \cdot 10^6}}, \quad (2.28)$$

де $R_{ин}$ - радіус заточування індентора.

При обробці вібраційно-зміцнюючій обробці величина шорсткості змінюється від вихідного значення до деякого характерного для застосовуваного методу обробки і його технологічних параметрів, що отримав назву «шорсткість, що встановилася». Її профіль утворюється в результаті перетину і накладання слідів одиничного взаємодії кульок з поверхнею деталі. Збільшення часу обробки може призвести до пере наклепу оброблюваної поверхні, що призводить до різкої втрати якості поверхневого шару. Найбільш вдала теоретично-ймовірна модель формування шорсткості поверхні при різних видах абразивної обробки, представлена в роботі [35]. Запропонований у цій роботі підхід може бути використаний і для опису процесу формування шорсткості при обробці поверхневим пластичним деформуванням.

$$Ra_{уст} = 0,0022 \cdot \sqrt{\frac{h_{max} \cdot a \cdot b \cdot l_{од}}{R^2}}, \quad (2.29)$$

де $l_{од}$ - значення одиничної довжини;

k_s - коефіцієнт завантаження робочої камери.

Також встановлено, що залишкові напруження, які формуються в поверхневому шарі в процесі вібраційно-зміцнюючої обробки, значно впливають на їх експлуатаційні властивості при знакозмінних навантаженнях. Головну роль грає величина залишкової напруження, знак залишкової напруження і характеру їх розподілу по глибині поверхневого шару деталей.

В даний час існує і широко використовується значне число методик експериментального визначення залишкових напружень, більшість з яких заснована на пошаровому видаленні поверхневого шару матеріалу деталі та вимірюванні залишкових деформацій, з подальшим розрахунком величини залишкових напружень. Як було сказано раніше, у розділі 1, більшість даних методик є досить трудомісткими і не дають можливість оперативної оцінки

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі оброблених деталей.

2.3 Висновки до розділу

З урахуванням вищевикладеного, одним із перспективних напрямків, що дозволяє спрогнозувати знак і глибину залягання залишкових напружень у поверхневому шарі, є розробка розрахункового апарату, який дозволить скоротити кількість трудомістких експериментальних досліджень. Для визначення залишкової напруженості було проведено моделювання напружено-деформованого стану вогнища деформації методом кінцевих елементів, отримані епюри полів напружень. Це дозволило значно зменшити трудомісткість розрахунку величини та глибини проникнення залишкової напруженості при зміцнюючій обробці.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Обладнання для проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження процесу вібраційно-зміцнюючої обробки проводилися на вібраційному верстаті УВГ 4x10 (при встановленні однієї камери об'єм може становити 50 л або 100 л). Безперечною перевагою даного обладнання є: універсальність, проста конструкція, зручність в експлуатації. Вібраційні верстати успішно використовуються різних підприємствах. Найбільш повне опис устаткування представлено роботах [2, 28]. Технічна характеристика обладнання наведена у табл. 3.1, на рис. 3.1 представлений зовнішній вигляд устаткування.

Експериментальні дослідження здійснювалися за вільного завантаження зразків у робочу камеру верстата. При завантаженні сталевих кульок і деталей необхідно забезпечити заповнення робочої камери на 80%. У ході експерименту проводилося безперервне промивання технологічною рідиною. Як технологічна рідина застосовувався 0,2% розчин Na_2CO_3 .

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика верстату для вібраційно-зміцнюючої обробки

Найменування	Одиниці виміру	Модель верстата
		УВГ 4x10
Число робочих камер	штук	2
Об'єм робочої камери	дм ³	50
Привід вагань	-	дебалансний
Розташування вібратора	-	горизонтальне
Тип робочої камери	-	прямокутний
Амплітуда коливань	мм	0,5-5
Частота коливань	Гц	16, 26, 33, 40
Потужність ел./дв. приводу вібратора	кВт	1,7
Маса	кг	1012
Габаритні розміри:	м	1,76 x1,0x1,05
Об'єм бака відстійника	дм ³	200
Тип насосу		ПА-22
Потужність насосу	кВт	0,12
Продуктивність насоса	л/хв	22

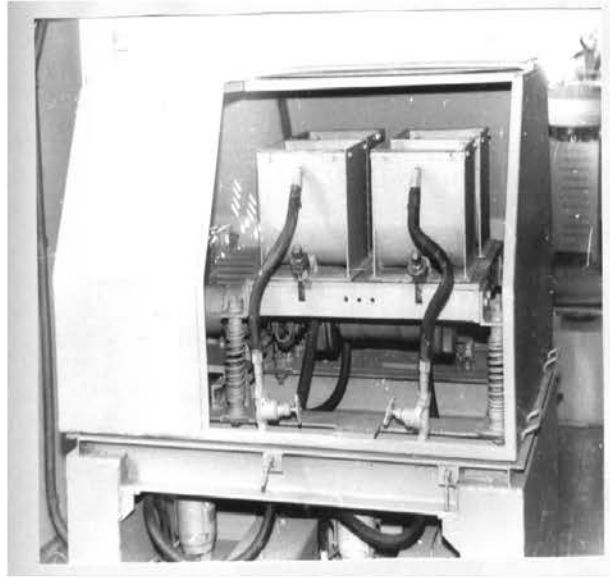


Рисунок 3.1 – Вібраційно-зміцнюючий верстат УВГ 4x10

3.2 Пристрої та прилади для експериментальних досліджень

Геометричні параметри шорсткості поверхні експериментальних зразків вимірювали портативним вимірювальним приладом моделі TR -200 (рис. 3.2). Технічні характеристики профілометра TR -200 представлені у табл. 3.2.

Опис: Прилад для вимірювання шорсткості поверхонь

Конструкція профілометра SJ-210 включає два блоки:

- блок індикації;
- блок виміру.



Рис. 3.2 – Портативний профілометр моделі TR -200

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики профілометра моделі TR -200

Найменування	Одиниця виміру	Значення
Детектор		
Метод детектування	-	Метод диференціальної індукції
Діапазон вимірювань	мкм	360 (від -200 до +160)
Матеріал щупа	-	Алмаз
Радіус щупа	мкм	5
Зусилля виміру	мН	4
Радіус кривизни платформи	мм	40
Привід		
Діапазон переміщення	мм	21
Швидкість поперечного переміщення під час виміру	мм/с	0,25; 0,5; 0,75
Час повернення	мм/с	1
Функція відведення детектора	-	Підйом щупа
Конфігурація нижньої частини	-	V-подібний жолоб
Джерело живлення		
Мережевий адаптер: Номинальні параметри Напруження живлення		9В; 1,3А 100В
Вбудований акумулятор: час заряджання кількість вимірів на одну зарядку температура під час заряджання		Макс. 4 години Прибл. 1000 5-40 °С
Діапазон температури та вологості		
Робоча температура		5-40 °С
Температура зберігання		-10°С-50°С
Вологість під час роботи/зберігання	%	85
Вага	г	498

Установка блоку вимірювання може бути зроблена безпосередньо в блок індикації або з використанням кабелю довжиною 1 м, що дозволяє вимірювати шорсткість поверхні в місцях з важким доступом, наприклад, внутрішні поверхні труб; а також встановлювати TR -200 прямо на деталь під час її виготовлення. Безперечною перевагою даного приладу є його простота у використанні, легкість у встановленні та позиціонуванні на контрольованій деталі. Повірки приладів, що проводилися, показали, що похибка TR -200 не перевищувала 5%.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Профілометр TR -200 може працювати від мережі змінного струму, так і від портативного джерела постійного струму (батареї). Відображення зчитування в будь-якій орієнтації, що робить дуже зручною експлуатацію приладу. Налаштування кольору, профіль шорсткості на екрані, одночасне відображення різних параметрів шорсткості.

Можливість збереження до 10000 зчитувань на картку пам'яті. Роз'єм USB, RS232 для обміну даними з ПК.

Вимірювання величини параметрів мікротвердості поверхневого шару здійснювалася на мікротвердомірі ПМТ-3, табл. 3.3 містить технічні характеристики ПМТ-3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики мікротвердоміра ПМТ-3

Найменування	Одиниця виміру	Значення
Збільшення мікроскопа	-	130 та 487
Алмазна піраміда: кут при вершині вістря при вершині межі навантаження	- мкм Гс	136° не більше 1 2-200
Межі виміру діагоналей відбитків (з об'єктивом F=6,2)	мм	0,005-0,25
Предметний столик: межі повороту межі поздовжнього переміщення межі поперечного переміщення ціна розподілу шкали мікрометричної подачі	- мм мм мм	~ 0-180 ° 0-10 0-10 0,01
Живлення здійснюється через трансформатор від мережі змінного струму 127/220В		
Габаритні розміри: мікротвердоміра в робочому положенні трансформатора	мм	410x290x200 145x110x70
Маса	кг	21,6



Рисунок 3.3 – Мікротвердомір ПМТ-3



Рисунок 3.4 – Мікроскоп стереоскопічної моделі МБС-2

Вивчення зовнішнього вигляду поверхні оброблених зразків та появи перенаклепу здійснювалося на мікроскопі стереоскопічному моделі МБС-2 (рис. 3.4) при збільшеннях $\times 16$; $\times 32$; $\times 56$, характеристики мікроскопа наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики мікроскопа МБС-2

Найменування	Одиниця виміру	Значення
Збільшення	кратність	3,5-88
Точка зору	мм	39-2,6
Робоча відстань	мм	64
Джерела світла електрична лампа (живлення лампи здійснюється через блок живлення від мережі змінного струму 220В)		8В, 20Вт
Габаритні розміри	мм	400x254x460
Маса	кг	27,3

На твердомірі за методом Брінелля моделі ТШ-2М визначалася твердість НВ. На рис. 3.5 представлений ТШ-2М, а технічні характеристики твердоміра наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики твердоміра ТШ-2М

Найменування	Одиниця виміру	Значення
Твердість, що вимірюється приладом	НВ	8-450
Випробувальні навантаження	кгс	3000; 1000; 750; 250; 187,5
Допустима похибка навантажень	%	±1
Тривалість витримки випробуваного зразка під навантаженням	с/к	10; 30; 60
Діаметр сталевих кульок до наконечників	мм	10; 5; 2,5
Розміри робочого простору: найбільша висота робочого простору відстань від центру відбитка до станини	мм	250 125
Габаритні розміри	мм	730x225x880
Вага приладу	кг	180



Рисунок 3.5 – Твердомір ТШ-2М

Реєстрація та контроль параметрів коливань вібраційних верстатів здійснювалися вібрографом ВР-1.

3.3 Зразки для проведення експериментальних досліджень

Враховуючи універсальність представлених раніше теоретичних моделей та можливість широкого застосування результатів досліджень для обробки деталей, було зроблено вибір матеріалів зразків для експериментальних досліджень.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріали зразків: сталь 40. Виготовлення зразків здійснювалося із пруткового прокату.

Таблиця 3.6 – Механічні властивості матеріалу зразків

Матеріал зразка	Межа текучості (МПа)	Твердість за Брінеллем
Сталь 40	340	197

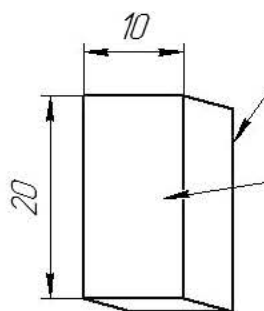


Рисунок 3.6 – Зразки для вимірювання мікротвердості

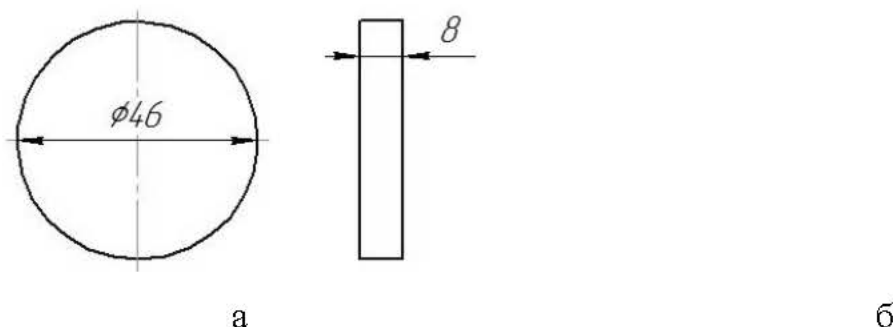


Рисунок 3.7 – Зразки для вимірювання шорсткості поверхні

3.4 Методика вимірювання мікротвердості поверхневого шару

Мікротвердість, будучи однією з найважливіших характеристик фізико-механічних властивостей поверхневого шару, розглядається як наслідок пружно-пластичних деформацій, що виникають у процесі фінішної обробки [21, 22].

Експериментальні дослідження мікротвердості при оздоблювально-зміцнювальній проводилися на призматичних зразках розміром 20x20x10 із сталей 40. Зразки, виготовлені зі сталі, були піддані гартуванню і низької відпустки. Після проведення термообробки зразки зазнавали шліфування.

Відшліфовані зразки фіксувалися в оправці (у кожному оправку встановлювалося по два зразки), що складається з двох металевих пластин, що з'єднуються між собою болтами. Потім підготовлений мікрошліф піддавався травленню 10% розчином азотної кислоти. Вихідна мікротвердість зразків для експериментальних досліджень визначалася на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням 10, 20 і 50 г (залежно від марки матеріалу), збільшення 800-900, окуляр 10, об'єктив 4.3. Після цього зразки складалися підготовленими поверхнями, встановлювалися в тому ж пристрої і піддавали обробці на верстаті: УВГ 4x50. Обробка відбувалася при постійному промиванні 0,2% розчином кальцинованої соди.

Після обробки, вилучені з оправки зразки, промивалися і сушилися. На мікротвердомірі ПМТ-3 проводилося вимірювання їхньої мікротвердості поверхневого шару. Вимірювання проводилися в кількох точках, розташованих на різній відстані від краю зразка (25, 50, 75, 100, 150, ... 225 мкм). Для визначення величини мікротвердості використовувалися таблиці [27].

3.5 Методика дослідження явища перенаклепу поверхневого шару

У процесі оздоблювально-зміцнювальної обробки може виникати явище пере наклепу. Дане явище характеризується формуванням тонкого лускатого поверхневого шару з фарбуванням фрагментів металу (апелсинової кірки).

Експериментальні дослідження явища пере наклепу при оздоблювально-зміцнювальній проводилися на циліндричних зразках діаметром 46 і 20 мм та товщиною 8 мм до утворення лускатого поверхневого шару

Зразки з різних матеріалів завантажувалися в камери верстатів і оброблялися до утворення лусочок металу, що відшаровуються. Обробка проводилася при промиванні розчином кальцинованої соди та без ТР.

Після обробки зовнішній вигляд поверхні оброблених зразків вивчався на стереоскопічному мікроскопі моделі МБС-2 зі збільшенням: x16; x32; x56.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Дослідження параметрів якості поверхневого шару при вібраційно-зміцнюючій обробці

Як було зазначено в розділі 1, експлуатаційні властивості деталей значною мірою залежать від вихідного стану матеріалу та параметрів якості поверхневого шару: шорсткості поверхні, ступеня деформації, глибини зміцненого шару та залишкової напруженія. Якість поверхневого шару здатна вплинути на такі експлуатаційні властивості як зносостійкість, контактна жорсткість, корозійна стійкість, контактна міцність, міцність втоми і довговічність.

Дослідження були спрямовані на вивчення впливу механічних властивостей деталей, технологічних параметрів обробки та характеристик робочого середовища на зміну параметрів якості поверхневого шару.

У ході експериментальних досліджень було визначено глибину зміцненого шару h_n при послідовному нанесенні пластичних відбитків алмазною голкою ПМТ-3. Відбитки наносилися від кромки зразка – у глибину металу по шліфованій поверхні. Судити про глибину зміцненого шару необхідно по нижньому кордоні, де мікротвердість перестає змінюватися.

Після того, як було визначено величину мікротвердості поверхневого шару оброблених зразків, значення ступеня деформації визначалися залежно від:

$$\varepsilon = \frac{H_{\mu} - H_{\mu(0)}}{H_{\mu(0)}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де H_{μ} - мікротвердість, що вимірюється на поверхні зразка;

$H_{\mu(0)}$ - мікротвердість, що вимірюється в серцевині зразка.

На рисунках 4.1-4.7 представлені графіки зміни глибини зміцненого шару деталей та ступеня деформації для різних видів обробки з урахуванням залежності від матеріалу деталі та технологічних параметрів обробки.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$h_n, \text{мм}$

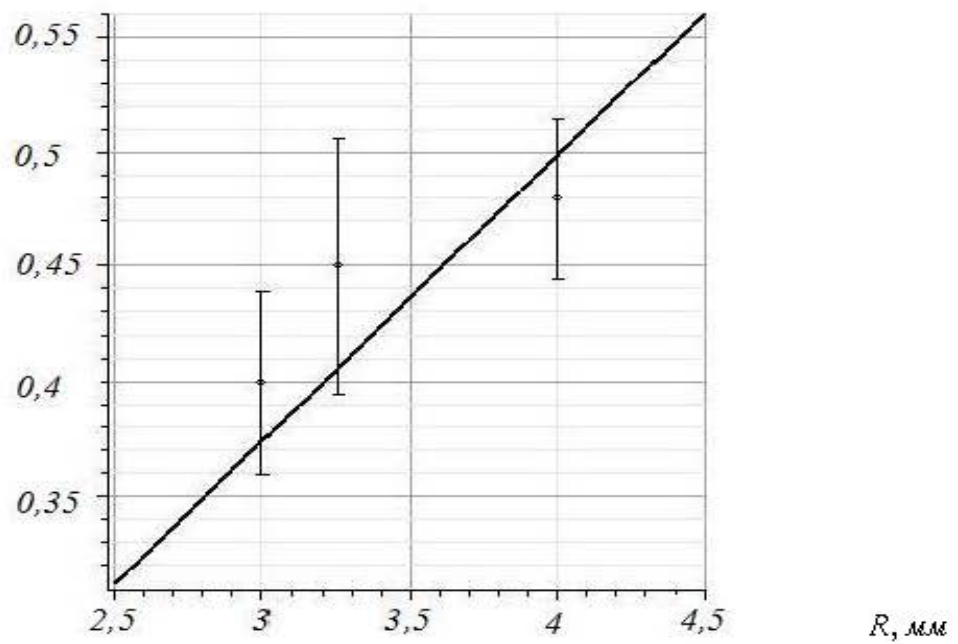


Рис. 4.1 – Залежність зміни глибини зміцненого шару від радіусу кульки при $\gamma = 20$ Гц; $A = 1$ м; $\sigma_{\text{ж}} = 340$ МПа для Сталі 40

$h_n, \text{мм}$

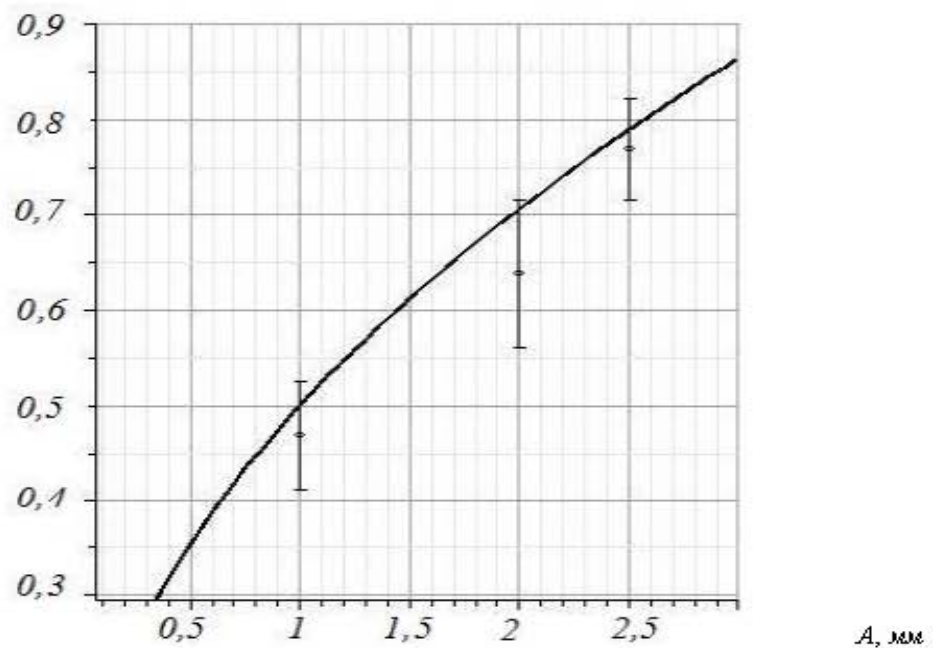


Рис. 4.2 – Залежність зміни глибини зміцненого шару від амплітуди коливань робочої камери при $\gamma = 20$ Гц; м; $R = 4$ мм; $\sigma_{\text{ж}} = 340$ МПа для Сталі 40

Змн.	Арх.	№ докum.	Підпис	Дата

КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ

Арх.

44

$h_n, \text{мм}$

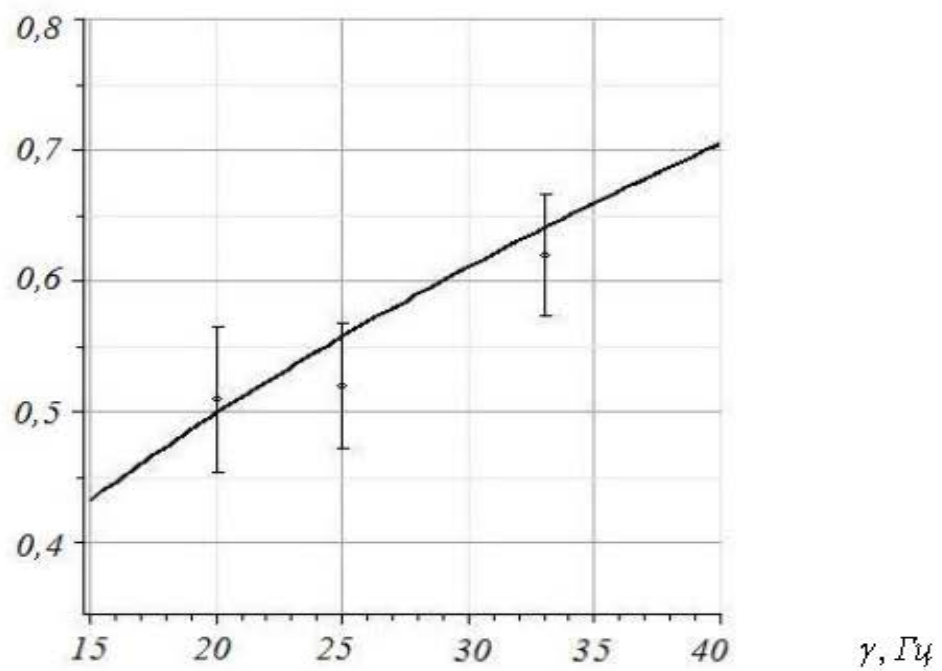


Рис. 4.3 – Залежність зміни глибини зміцненого шару від частоти коливань робочої камери при $A=1 \text{ мм}$; $R=4 \text{ мм}$; $\sigma_{\text{ж}}=340 \text{ МПа}$ для Сталі 40

$h_n, \text{мм}$

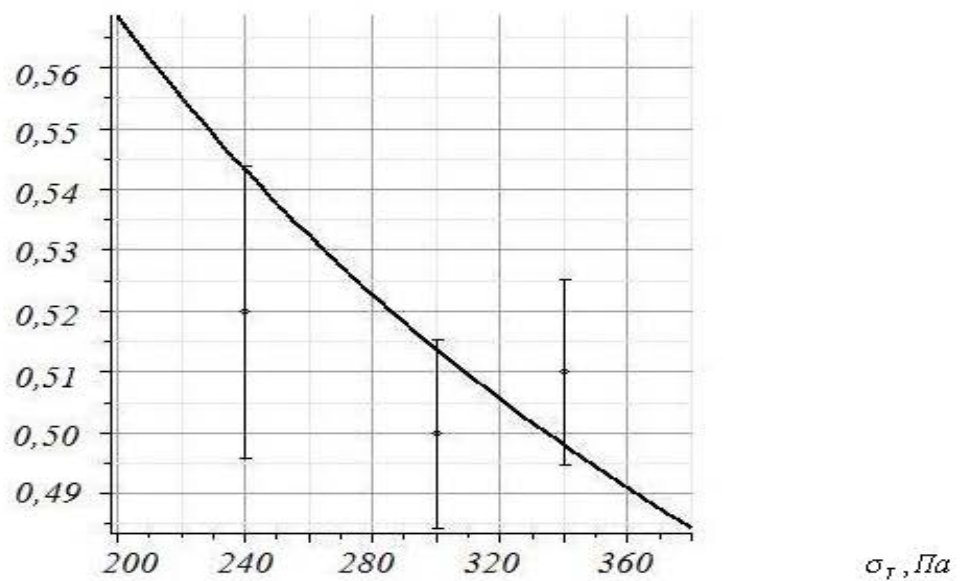


Рис. 4.4 – Залежність зміни глибини зміцненого шару від межі текучості матеріалу при $A=1 \text{ мм}$; $\gamma=20 \text{ Гц}$ $R=4 \text{ мм}$

Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата

КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ

Арх.

45

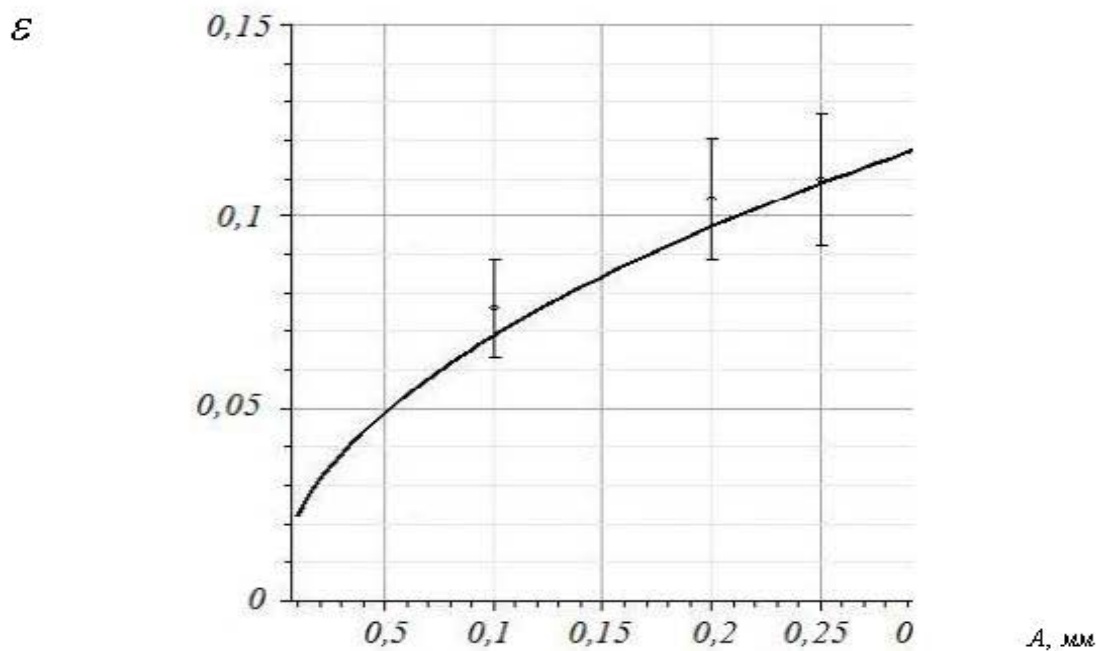


Рис. 4.5 – Залежність зміни ступеня деформації поверхневого шару від амплітуди коливань робочої камери при $\gamma = 20$ Гц; $R = 4$ мм; $HB = 197$ кгс/мм² для Сталі 40

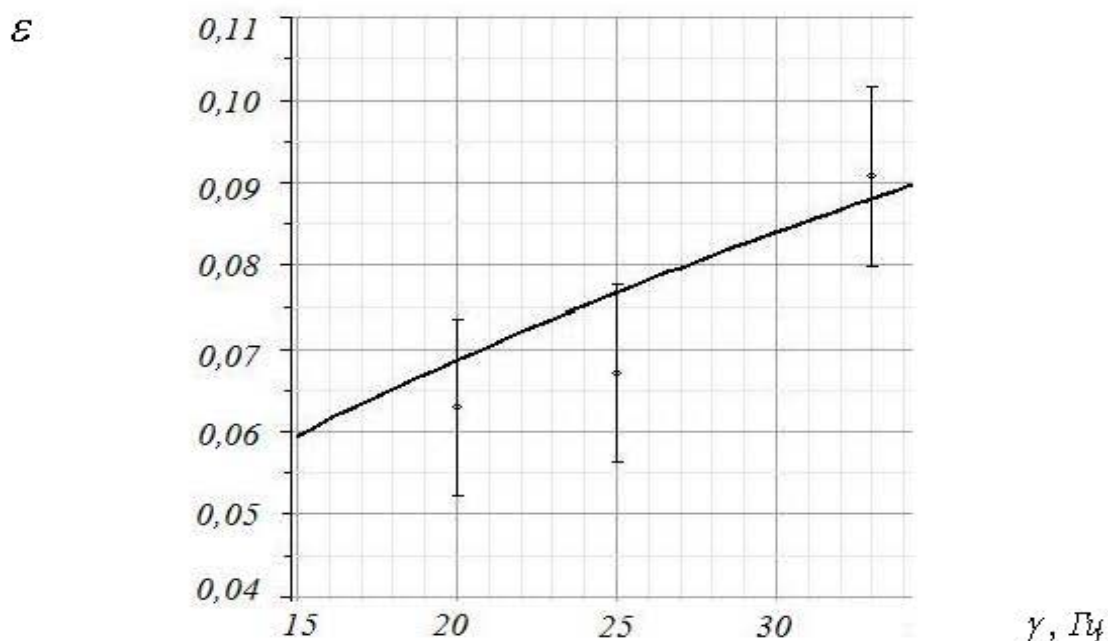


Рис. 4.6 – Залежність зміни ступеня деформації поверхневого шару від частоти коливань робочої камери при $A = 1$ мм; $R = 4$ мм; $HB = 197$ кгс/мм² для Сталі 40

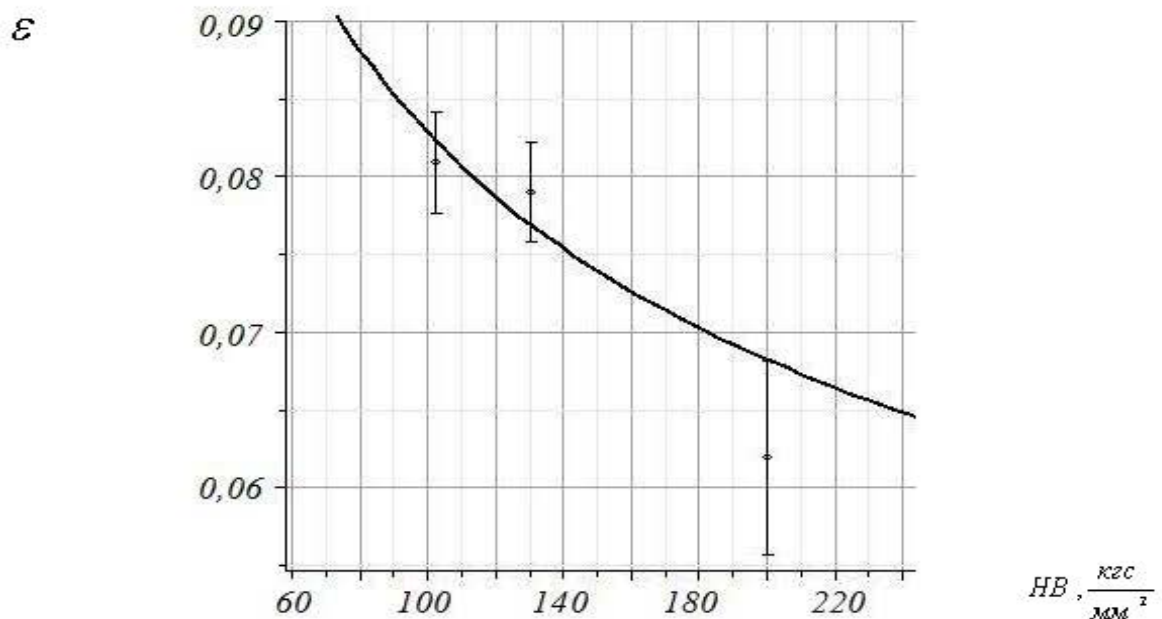


Рис. 4.7 – Залежність зміни ступеня деформації поверхневого шару від твердості матеріалу за Бріне ллем при $A=1\text{мм}$; $\gamma=20\text{Гц}$; $R=4\text{мм}$

На приведених графіках відображаються порівняння теоретичних та експериментальних досліджень змін глибини зміцненого шару деталі та ступеня деформації від діаметра кульки, амплітуди та частоти коливань робочої камери, матеріалу зразків для вібраційно-зміцнюючої обробки. Теоретична крива представлена суцільною лінією, а точками нанесено значення, отримані в результаті експериментальних досліджень з довірчими інтервалами (95%).

4.2 Дослідження явища перенаклепу поверхневого шару деталей

Як зазначалося у розділі 2, пере наклеп поверхневого шару оброблених деталей є вкрай негативним явищем. При виникненні пере наклепу відбувається руйнування кристалічних ґрат, яке супроводжується луцненням і відшаровуванням частинок металу. Навіть застосування термообробки не дозволяє відновити якість вихідного металу.

Для використання отриманих раніше залежностей розрахунку раціонального часу обробки проведено кілька серій експериментів з визначення часу пере наклепу з використанням зразків з різних матеріалів. Результати

експериментальних досліджень представлені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Дослідження часу появи переклепу при вібраційно-зміцнюючій обробці

Вид обробки	Параметри обробки	Матеріал зразка	Час виникнення переклепу, хв
ВЗО	R=3 мм; $\gamma=33,4$ Гц, A=4 мм Без ТР	Сталь 40	50
	R=3 мм; $\gamma=33,4$ Гц, A=4 мм ТР: $H_2O + Na_2CO_3$		130
	R=6 мм; $\gamma=40$ Гц, A=4 мм Без ТР		55
	R=6 мм; $\gamma=40$ Гц, A=4 мм ТР: $H_2O + Na_2CO_3$		110

Отримані результати слід використовувати під час проектування технологічних процесів вібраційно-зміцнюючої обробки деталей із сталі 40. При виборі режимів технологічних параметрів і характеристик робочих середовищ слід звертати увагу на те, щоб розрахунковий час обробки гарантовано не перевищував часу досягнення переклепу.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Розробка технологічних рекомендацій

Оптимізація параметрів обробки залежить від правильного вибору технічних обмежень, які визначають сферу існування оптимальних рішень. Необхідно якомога точніше формулювати обмеження, що впливають із виробничих умов. За таких умов залишається менша кількість варіантів процесу, що розглядається як основа для вибору оптимального рішення [15].

Оптимальним режимом пластичного деформування, що проводиться з метою зміцнення деталей, що зазнають циклічних навантажень, є той, який дозволить забезпечити максимальне збільшення межі витривалості деталі порівняно з його вихідним значенням.

У загальному випадку для матеріалу деталі з певним набором фізико-механічних властивостей величина межі витривалості залежить від наступних факторів: величини та розподілу залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі деталі після вібраційно-зміцнюючої обробки, глибини зміцненого шару, ступеня деформації та шорсткості поверхні.

Залежності визначення глибини зміцненого шару неможливо визначити раціональний фізичний стан поверхневого шару. Цей стан формується в процесі обробки деталі і визначається конкуруючим впливом двох процесів, що протікають паралельно, з одного боку - фізичного зміцнення (наклепу) і руйнування з іншого. У міру збільшення інтенсивності деформації відбувається безперервне зростання межі текучості матеріалу деталі за рахунок наклепу. Найбільші залишкові напруження стиску близькі до зростаючої межі текучості.

В інтересах посилення сприятливих факторів потрібно прагнути до максимальної інтенсивності деформації поверхневого шару. Однак, за такої інтенсивності, збільшується ймовірність процесу одночасного розміщення поверхневого шару, тому необхідно забезпечити оптимальну величину інтенсивності деформації, при якій збільшення межі витривалості деталі буде найбільшим. Очевидно, вона повинна бути більшою за інтенсивність деформації

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на межу текучості ε_T та менше інтенсивності деформації безпосередньо перед руйнуванням ε_p .

Враховуючи результати роботи [23], при описі деформаційного зміцнення, можна вважати, що головна частина пластичності ресурсу вичерпується на стадії рівномірної деформації $\varepsilon_i < \varepsilon_p$, а за її межами спостерігається значне зростання кількості та розміру мікрodefektів (тобто при $\varepsilon_i > \varepsilon_p$).

Для оптимізації технологічних процесів вібраційно-зміцнюючої обробки як цільову функцію обрана інтенсивність деформації. Таким чином, з великої кількості варіантів поєднання технологічних режимів і характеристик робочих середовищ вибирається такий, що забезпечує величину інтенсивності деформації найбільш близьку до рівноважної. Як вихідні дані, необхідні для початку розрахунку використовуються параметри певного виду обробки, значення заданої глибини зміцненого шару і ступеня деформації, вихідної та заданої шорсткості поверхні, характеристики матеріалу деталі, діапазон радіусів використовуваних інденторів, масив режимів обробки. При виборі оптимального варіанта використовуються обмежувальні функції, якими може виступати задана глибина зміцненого шару, ступінь деформації або параметри необхідної шорсткості поверхні. Таким чином, при подальших технологічних розрахунках,

Після того, як були досягнуті задані значення параметрів якості поверхневого шару, відбувається перебір та аналіз показників інтенсивності деформації ε_i , що задовольняють умовам $|\varepsilon_i - \varepsilon_p| \leq \tau$, а потім вибирається варіант технологічного процесу, при якому $|\varepsilon_i - \varepsilon_p| = \min$. Після проведених розрахунків на екран виводяться параметри: задана глибина зміцненого шару та ступінь деформації, шорсткість поверхневого шару, показники інтенсивності деформації та граничної рівномірної деформації, параметри обробки.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 5.1 представлено блок-схему алгоритму оптимізації процесу вібраційно-зміцнюючої обробки [19].

Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритму оптимізації процесу вібраційно-зміцнюючої обробки

5.2 Екологічна експертиза

Відомі способи підготовки поверхні сталевих виробів під захисні неметалеві покриття можна розділити на три основні групи [4]: хімічні; фізичні; механічні.

Розглядаючи ці способи очищення металевої поверхні з погляду екологічної безпеки можна відзначити наступне [36, 37].

Хімічні способи передбачають знежирення в лужних розчинах або органічних розчинниках з послідуєчим травленням в розчинах мінеральних кислот, промивку, нейтралізацію і сушку виробів. Для їх здійснення застосовують водні розчини лугів, кислот і органічних розчинників різного різного складу. Хімічні способи дозволяють повністю автоматизувати процес очищення металевих виробів. Проте вони мають істотні недоліки – робота з вогнебезпечними, легколетучими, отруйними органічними рідинами і з агресивними кислотами і лугами приводить до забруднення навколишнього середовища. Це вимагає додаткових заходів щодо охорони праці, очисних споруд, а також спеціальних конструкційних матеріалів для ванн травлення. Тому, як у нас в країні, так і за кордоном, спостерігається стійка тенденція по заміні хімічних способів іншими менш шкідливими для навколишнього середовища.

Фізичні способи очищення засновані на використанні різних фізичних явищ: ультразвукових коливань, вібрацій, напруженості електричного поля, підвищеної температури, високого тиску і т.д. Вони, як правило, передбачають обробку в масло агресивних травильних рідинах. У цьому полягає їх перевага перед

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хімічними способами. Недолік фізичних способів: велика енергоємність, необхідність використання додаткового устаткування, іноді дорогого і складного в експлуатації. У основному фізичні способи припускають наявність інструменту, тому вони складніші в автоматизації і застосовуються, головним чином, для очищення поверхні виробів з важкооброблюваних матеріалів.

Механічні способи очищення поверхні металевих виробів полягає в знятті шару металу з оброблюваної поверхні механічним шляхом. До механічних способів очищення відносяться: головка, фрезерування, точіння, голкофрезерування, шліфування, дробеструміння, дробеметання і ін. З причини своєї простоти механічні способи очищення отримали найбільш широке розповсюдження. Їх застосовують, в основному, для очищення поверхні великогабаритних виробів, де перші два способи не придатні. Механічні способи є найменш енергоємними і не приводять до істотного забруднення навколишнього середовища. У цьому полягає їх велика перевага перед хімічними і фізичними способами. Недолік механічних способів – трудність механізації операції очищення при обробці виробів складеної форми [36].

З механічних способів найбільш широкого поширення останнім часом набула дробеструменева обробка, яка володіє певними перевагами перед іншими, а саме технічна гнучкість, невисока енергоємність, можливість застосування для очищення поверхні механічних виробів складної форми, можливість застосування в польових умовах, простота конструкції дробеструменевого устаткування, незначному забрудненню навколишнього середовища механічним пилом і ін.

В порівнянні з травленням ППД дозволяє збільшити довговічність подальшого неметалічного захисного покриття, як мінімум в 1,5 разу.

5.3 Охорона праці. Правила безпеки при зміцнювальній обробці деталей

Вимоги до приміщень. Виробничі, адміністративно-конторські та побутові приміщення дробеструминних відділень повинні задовольняти вимогам діючих:

а) «Санітарних норм проектування промислових підприємств» Н 101-54 1 з

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наступними змінами;

б) «Протипожежних норм будівельного проектування промислових підприємств і населених місць» Н 102-542.

Санітарні утримання зазначених відділень має задовольняти вимогам діючої «Інструкції по санітарному утриманню промислових підприємств», затвердженої Головним державним санітарним інспектором. Процеси ППД деталей повинні виконуватися в ізольованих приміщеннях. Допускається розташовувати окремі установки в поточних механізованих або автоматизованих лініях. При цьому обов'язковими умовами повинні бути проведення заходів по обмеженню шуму до допустимих величин, встановлених «Тимчасовими санітарними нормами і правилами щодо обмеження шуму на виробництві» і кількості шкідливих виділень в повітрі (на робочих місцях) не вище гранично допустимих концентрацій [38-39].

Виробничі приміщення зазначених відділень повинні бути розташовані по відношенню до інших заводських будівлям, не пов'язаним з виділенням газів або пилу, з підвітряного боку (при явно вираженому напрямку панівних вітрів).

Зазначені приміщення належить розташовувати біля зовнішніх стін заводського будівлі з примиканням до них однією з найбільш протяжних сторін.

Стіни в приміщеннях повинні бути гладко оштукатурені і пофарбовані масляною фарбою світлих тонів. Підлогу у виробничих приміщеннях повинні бути рівні, міцні і не слизькі, а в гідропіскоструминної відділеннях - повинні мати ухил (для стоку в трап) і виготовлятися з бетону.

У відділеннях слід виробляти (не рідше одного разу на місяць) очистку стін і обладнання за допомогою промислових пилососів. Крім того тут щодня слід проводити прибирання підлог вологим способом.

Все поглиблення в підлозі (приямки, траншеї та інші) повинні бути закриті міцними перекриттями. Міцність перекриттів повинна відповідати навантаженні, необхідної за умовами виробництва. Відкриті канали, траншеї та інші поглиблення в підлозі, а також майданчики, які виступають над рівнем підлоги більш ніж на 300 мм, повинні бути огорожені поручнями висотою 1-1,2 м.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Місця для проходу в ці поглиблення і на виступаючі майданчики повинні мати похилі площини з ухилом не більше 0,2 або сходи з двосторонніми поручнями

Вентиляція та опалення. Надходження шкідливих виділень в повітря виробничих приміщень та їх поширення в ньому повинні бути попереджені насамперед технологічними заходами і конструктивними рішеннями (механізацією технологічних процесів і герметизацією обладнання).

Вентиляційні установки повинні забезпечувати в робочих приміщеннях метеорологічні умови, рекомендовані в розділі «Опалення» діючих правил, а також зниження вмісту пилу до концентрацій нижче гранично допустимих норм, вказаних в документі № 279-59 «Гранично допустимі концентрації отруйних газів, парів і пилу в повітрі робочих приміщень» [38].

У виробничих приміщеннях відділень по очищенню деталей повинна бути влаштована припливно-витяжна вентиляція. Проекти вентиляційних установок повинні бути узгоджені з ОТБ підприємства і місцевими органами Держсанінспекцією і Державного пожежного нагляду.

При проектуванні, влаштуванні та експлуатації вентиляційних установок повинні бути виконані вимоги санітарних норм Н 101- 541, протипожежних норм Н 102-542 і «Правил технічних випробувань, приймання та експлуатації вентиляційних установок», розроблених Держстандартом.

Пуск в експлуатацію нових вентиляційних установок повинен проводитися тільки після приймання їх спеціальною комісією за участю представників ОТБ підприємства, Держсанінспекцією і Державного пожежного нагляду. Для комісії повинні бути представлені: протокол інструментальної перевірки ефективності роботи вентиляційної установки, технічний паспорт та інструкція з експлуатації.

Місцева витяжна вентиляція повинна бути обладнана на всіх ППД установках. Об'єми відсмоктується повітря повинні відповідати даним.

При виборі місця для забору припливного повітря необхідно гарантувати найменшу його забрудненість (в першу чергу шкідливими виділеннями самих відділень).

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Забір зовнішнього повітря повинен проводитися переважно з боку бічних огорожень будівлі. Нижня частина повітрозбірника повинна розташовуватися на висоті не менше 2 м від рівня землі.

Повітря, що видаляється місцевими відсмоктуючими пристроями, повинне очищатися перед викидом в атмосферу фільтрами (дробоструминні установки) і сепараторами (гідропіскоструминні установки).

Якщо вміст пилу в повітрі, що видаляється не перевищує 150 мг/м^3 , допускається викид його в атмосферу без очистки. Викид запиленого повітря, що видаляється витяжними установками, повинен проводитися на рівні не нижче 2 м над найвищою точкою дахового перекриття.

Видалення пилу у фільтрі повинно здійснюватися механічним способом, що не допускає запилення навколишнього повітря.

У відділеннях очищення деталей повинні бути проведені заходи щодо усунення шуму і вібрацій в вентиляційних установках. Вентиляційні установки, що створюють вібрації і шум, рівень якого перевищує 75-85 дБ, до роботи не допускається.

На заводах повинна бути встановлена періодична система очищення вентиляційних пристроїв. Періодичність визначається з урахуванням конкретних умов.

Заводські лабораторії повинні систематично контролювати ступінь запиленості повітряного середовища в зазначених відділеннях в певних точках робочих місць не рідше одного разу на квартал.

У всіх виробничих, допоміжних і побутових приміщеннях повинно бути опалення, що забезпечує при розрахунковій температурі (застосовується відповідно до розділу II «Будівельних норм і правил») внутрішню температуру приміщення, рівну 15-18 °С.

Для обігріву приміщень допускається застосовувати обладнання тільки з гладкими поверхнями, що дозволяють легко очищати їх від пилу (гладкі труби, радіатори і т. п.).

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.4 Техніко-економічне обґрунтування розробки

При розрахунку економічного ефекту від застосування модуля для ППД враховуємо два чинники, які дають перевагу обробки дробом на фінішних операціях, а саме вища продуктивність – в 2 рази вище при однаковій собівартості, чим при зміцненні механізованим інструментом, і краща кількість обробки, яка дозволяє збільшити довговічність і зносостійкість не менше, чим в 2 рази.

Для вирішення даного завдання застосовуємо методику знаходження економічної ефективності [40] використання в народному господарстві нової техніки, винаходів і раціоналізаторських пропозицій, яка рекомендує розрахунок річного економічного ефекту від виробництва і використання нових засобів праці довготривалого застосування і з покращуваними якісними характеристиками за термін їх служби з урахуванням морального зносу визначати за формулою:

$$\mathcal{E}_{нт} = (Z_{баз} - Z_{нт})N_{нт}, \quad (5.1)$$

де $\mathcal{E}_{нт}$ – річний економічний ефект від застосування нової техніки;

$Z_{баз}$ – приведені витрати на ППД 1м^2 сталевій поверхні за допомогою базового варіанту;

$Z_{нт}$ – приведені витрати на ППД 1м^2 сталевій поверхні за допомогою нової техніки;

$N_{нт}$ – річна продуктивність модуля при двозмінній роботі.

Відомо, що приведені витрати Z визначаються за формулою:

$$Z = C + e_n K, \quad (5.2)$$

де C – собівартість очищення 1м^2 сталевій поверхні;

$e_n = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності;

K – капітальні вкладення на 1м^2 оброблюваної поверхні.

За даними [41] собівартість обробки сталевій поверхні по базовому варіанту і при зміцненні дробом приблизно рівні між собою і рівні

$$C_{баз} = C_{нт} = C = 102 \text{ грн./м}^2.$$

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виробничий модуль при годинній продуктивності $a_{нт}=6\text{м}^2/\text{год}$ дозволяє зміцнити за рік при двозмінній роботі і річному фонді робочого часу $T=4006$ годин площу

$$N_{нт} = a_{нт}T = 6 \cdot 4006 = 24036 \text{ м}^2/\text{год.} \quad (5.3)$$

Зміцнення за допомогою механізованого інструменту при $a_{баз}=3\text{м}^2/\text{год}$ за тих же умов дозволяє досягти річного об'єму

$$N_{баз} = a_{баз}T = 3 \cdot 4006 = 12018 \text{ м}^2/\text{год.} \quad (5.4)$$

Капітальні вкладення для базового варіанту складають $K_{о.баз}=200000$ грн, а для модуля, де встановлений більш потужний повітряний компресор і дробеструменевий апарат нагнітальної дії ємкістю 200л, будуть $K_{о.нт}=240000$ грн.

Тоді капітальні вкладення на 1 м^2 зміцнення сталеві поверхні складають:

для базового варіанту

$$K_{баз} = \frac{K_{о.баз}}{N_{баз}} = \frac{200000}{12018} = 16,64 \text{ грн./м}^2 \quad (5.5)$$

для нової техніки

$$K_{нт} = \frac{K_{о.нт}}{N_{нт}} = \frac{240000}{24036} = 9,98 \text{ грн./м}^2 \quad (5.6)$$

Таким чином, приведені витрати для базового варіанту

$$З = 102 + 0,15 \cdot 16,64 = 104,5 \text{ грн./м}^2$$

для нової техніки

$$З = 102 + 0,15 \cdot 9,98 = 103,5 \text{ грн./м}^2$$

Після підстановки набутих числових значень у формулу (4.4) знаходимо, що

$$\mathcal{E}_{нт} = (104,5 - 103,5)24036 = 24036 \text{ грн./год.}$$

Отриманий економічний ефект дає окупність додаткових капіталовкладень

$$T_{ок} = \frac{K_{о.нт} - K_{о.баз}}{N_{нт}} = \frac{24000 - 200000}{24036} = 1,7 \text{ року} \quad (5.7)$$

що менше нормативного $T_{ок,норм}=5 - 7$ років.

До викладеного слід додати, що технічна пропозиція завдяки зміцненню дробом, яке позитивно впливає на якість підготовки поверхні, дозволяє збільшити

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, можна зробити такі висновки та рекомендації:

1. Розроблено та уточнено теоретичну модель для визначення глибини зміцненого шару та ступеня деформації з урахуванням впливу форми сліду контакту.

2. Отримано теоретичну модель для розрахунку параметрів одиничної взаємодії кульки з поверхнею деталі для діапазону кутів $75^{\circ} \dots 90^{\circ}$ для вібраційно-зміцнюючої обробки.

3. Проведено експериментальні дослідження параметрів якості поверхневого шару при вібраційно-зміцнюючій обробці.

4. При порівнянні результатів теоретичних та експериментальних досліджень глибини зміцненого шару та ступеня деформації різниця між теоретичними та експериментальними значеннями не перевищує 20%.

5. Розроблено методику оптимізації технологічних параметрів обробки та характеристик робочих середовищ за критерієм максимальної межі витривалості.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список джерел посилання

1. А.А. Дудніков, І.А. Дудніков, А.О. Келемеш, О.В. Горбенко. Influence of the hardening treatment of a machine parts' material on wear-resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol 3, No 1 (93). P. 6–11.
2. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности машин. Киев : Техника, 1971. 144 с.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. Москва :Машиностроение, 1974. 134 с.
4. Келемеш А.О., Горбенко О.В. Дудніков І.А., Дудніков А.А. RESEARCH OF WEAR RESISTANCE OF BRONZE BUSHINGS DURING PLASTIC VIBRATION DEFORMATION. Східно-європейський журнал передових технологій, VOL 2, NO 11 (86) (2017) MATERIALS SCIENCE.
5. Новіков Ф. В., Анділахай О. О. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей: монографія. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 348 с.
6. Dudnikov A.A., Dudnikov I.A., Gorbenko O.V. Kelemesh A. Improving the technology of part machining by surface plastic deformation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. 2019. Vol. 6, № 1 (102). P. 26–32. (Scopus) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183541>
7. Dudnikov, A., Gorbenko O., Kelemesh A., Drozhchana O. Improving the technological process of restoring the tillage machine working parts. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 2, N 1 (104). P. 72-77. DOI :10.15587/1729-4061.2020.198962.
8. Дудніков А.А. Проектування технологічних процесів сервісних підприємств: навчальний посібник / А.А. Дудніков, П.В. Писаренко, О.І. Біловод, І.А. Дудніков, О.П.Ківшик. – Вінниця: Нова книга, 2011. 400 с.
9. Безъязычный В. Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. Инженерный журнал, 2001. № 4. С. 9–16.
10. Олейник Н. В. Поверхностное динамическое упрочнение деталей

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

машин. Киев : Техника, 1984. 150 с.

11. Горик О.В., Черняк Р.Є., Чернявський А.М., Брикун О.М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика. Полтава : Видавництво ПП «Астроя», 2021. 326 с.3

12. Дальский А.М. Механическая обработка металлов. Минск : Машиностроение, 1981. 264 с.

13. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей. Киев : Машиностроение, 1974. 134 с.

14. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Москва : Машиностроение, 1980. 157 с.

15. Кузаконь В.М. Исследование центробежного метода обработки деталей свободными абразивами и определение оптимальных технологических режимов и параметров оборудования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1977.

16. Бардинова, С. Н. Исследование качества поверхностного слоя при дробеструйной обработке в ремонтном производстве: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.02.08. Рыбинск, 2013. 17 с.

17. Димов Ю.В. Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: Дис. д-ра техн.наук:05.02.08. Иркутск, 1987. - 543 с.

18. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями. Мариуполь : ПГТУ, 2006. 190 с.

19. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием: Дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08, 2002 595 с.

20. Папшев Д.Д. Отделочно - упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1978. 152 с.

21. Воронцов, А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол : ТНТ, 2014. 522 с.

22. Горик О.В. Визначення оптимальних технологічних режимів дробе-

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струменевого очищення металевих поверхонь. Полтава: ПДАА, 2012. 100 с.

23. Степанов Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости. СТИН. - 2003. - №10. С. 15 -17.

24. Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Клименко А.А. Моделирование процесса единичного взаимодействия гранулы свободного абразива и обрабатываемой детали // Автоматизация и современные технологии. 2005. №5.

25. Терегулов Н.Г. Лазерные технологии на машиностроительном заводе. Уфа : КумАПП, 1993.252 с.

26. Chung Y. Prediction of geometry of the kerf created in the course of abrasive waterjet machining of materials / Y. Chung, E.S. Geskin, P. Singht // Jet Cutting Technol. 1992. P. 527 - 541.

27. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Под ред. Р. В. Гольдштейна: Пер. с англ. Москва : Мир, 1989. 510 с.

28. Zeng J. The Machinability of Porous Materials by a High Pressure Abrasive Waterjet / J. Zeng // Proc. of the Winter Annual Meeting of ASME. 1989.P. 37-42.

29. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении.- Москва :Машиностроение,1982. 176 с.

30. Пичко А.С. Струйно-абразивная обработка / Пичко А.С. Москва : НИИмаш, 1968. 56с.

31. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. Минск : Машиностроение, 1979. 216 с.

32. Карпов Я. С., Лепіхін П. П. Авіаційне матеріалознавство. Частина 1. Метали та сплави. Харків : ХАІ, 2004. 78 с.

33. Воронін С. Є. Про збільшення продуктивності дробоструминної камери всмоктувального типу : наукові журнали НТУ "ХП": *Інтегровані технології та енергозбереження*, 2007. № 2. С. 125-132.

34. Исупов М. Г. Струйно-абразивная финишная обработка металлов. *Технология машиностроения*, 2003. № 2. С. 36-37.

35. Горохов В.А. Обработка деталей пластическим деформированием. Киев :Техника, 1978. 192 с.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

36. Закон України « Про економічну експертизу» відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, №8, ст. 54.

37. Головка В.О. Сільськогосподарська екологія: навчальний посібник для студентів вузів. Харків: Ескада, 2009. 617 с.

38. Одарченко М.С., Степанов В.І. Основи охорони праці : підручник. Харків : Издат, 2017. 362 с.

39. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: навчальний посібник. Київ: Каравела, 2003. 408 с.

40. Кулішов В. В. Економіка підприємства: теорія і практика: навч. посіб. Київ : Ніка-Центр, 2002. 216 с.

41. Бойчик І. М. Економіка підприємства. Київ : Атіка, 2002. 480 с.

					КРМ.133ГМмд_22.22.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		