

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ____ ” _____ 2023 р.
Зав. кафедри _____ к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
_____ магістр
(освітній рівень)

тема роботи: **«Підвищення експлуатаційної стійкості інструменту методом
термофрікційного зміцнення»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми _____ магістр
спеціальності _____ 208
_____ «Агроінженерія»
_____ ШУЛЬГА А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Дідур В.В.
_____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище
та ініціали)

м. Умань – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ А.В. Войтік
“ ____ ” _____ 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту _____ **Шульзі А.В.** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Підвищення експлуатаційної стійкості інструменту методом термофрікційного зміцнення»

керівник роботи: д.т.н., професор Дідур В.В. _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“09” листопада 2023 р. № 01-06/256

2. Строк подання студентом роботи _____ 25.11.2023 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: методи термофрікційного (ТФО) та поверхнево-деформаційного оброблення (ПДО) матеріалів; методи термофрікційного (ТФЗ) та поверхнево-деформаційного зміцнення (ПДЗ) поверхні ; літературні джерела.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- встановити взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу й характеристиками зміцненого шару;
- встановити вплив ступеня пластичної деформації поверхневого шару на міцність деталей;
- визначити рівень залишкових напружень у поверхневих шарах після пластичного деформування;
- розрахувати оптимальні технологічні параметри режиму зміцнювального оброблення

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; графік порівняння мікротвердості та глибини шару; алгоритм вибору способу обробки; показники бізнес-плану;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Дідур В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2023 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2023 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2023 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2023 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2023 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2023 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2023 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2023 р.	

Студент

(підпис)

Шульга А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дідур В.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Шульга А.В. Підвищення експлуатаційної стійкості інструменту методом термофрікційного зміцнення (Дипломна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 82 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 27 рисунків, 22 таблиці, 36 джерел літератури).

Актуальність теми та її доцільність обумовлені необхідністю підвищення поверхневої міцності деталей з конструкційних та інструментальних сталей.

Розвиток сучасної промисловості неможливий без широкого використання технологій зміцнення виробів з різних матеріалів.

Для реалізації поставленої мети в першому розділі показані різні підходи та можливості зміцнення поверхонь з використанням методів, які включають тертя. Проаналізовані схеми устаткування для поверхневого зміцнення матеріалів. Так, диск для зміцнення може бути закріплений до шпинделя (вертикально-фрезерного, горизонтально-фрезерного) верстата за типом торцевих фрез.

В другому розділі розглянуто методи поверхневого пластичного деформування, обрано варіант який є найбільш оптимальним для деталей «Важіль» та задовольняє експлуатаційні вимоги. Найбільш оптимальним методом прийнято обкочування заготовки роликом.

В третьому розділі визначено напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика з довільною кривизною робочої поверхні в поверхню довільної кривизни.

Розроблено питання з охорони праці при виконанні поверхневого пластичного деформування.

Розроблено стартап – проект організації виробництва.

Ключові слова: ПОВЕРХНЕВА МІЦНІСТЬ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ, ОБКОЧУВАННЯ РОЛИКОМ, КОНСТРУКЦІЙНА СТАЛЬ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ВЕРСТАТ, СТАРТАП.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ	8
1.1 Методи термофрикційного (ТФО) та поверхнево-деформаційного оброблення (ПДО) матеріалів	8
1.2 Методи термофрикційного (ТФЗ) та поверхнево-деформаційного зміцнення (ПДЗ) поверхні	10
1.3 Висновки до розділу	34
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	36
2.1 Охоплююче поверхнєве пластичне деформування	38
2.2 Поверхнєве пластичне деформування з використанням відцентрового обкатника	42
2.3 ППД поперечної обкатки плоскими плитами	44
2.4 Обробно-зміцнююча обробка з осцилюючим вигладжуванням	46
2.5 Висновки розділу	50
РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	51
3.1 Глибина пластично деформованого шару.	51
3.2 Математичне моделювання процесу обкочування заготовки роликом	55
3.3 Висновки до розділу	56
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	57
4.1 Стан умов праці в галузі	57
4.2 Механічна обробка металів різанням	60
4.3 Токарські верстати	63
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	69
5.1 Розроблювання стартап – проекту	69
5.2 Технологічність проекту	70
5.3 Аналіз попиту продукту	70
5.4 Розроблення ринкової стратегії	74
5.5 Розроблення маркетингової програми	76
5.6 Висновки по розділу	77
ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

ВСТУП

Актуальність теми та її доцільність обумовлені необхідністю підвищення поверхневої міцності деталей з конструкційних та інструментальних сталей.

Розвиток сучасної промисловості неможливий без широкого використання технологій зміцнення виробів з різних матеріалів. При цьому велику зацікавленість мають підходи з використанням комплексних методів оброблення, які б дозволяли забезпечувати суттєве покращення властивостей матеріалу.

Термофрикційне оброблення (ТФО), яке є одним із ресурсозберігаючих методів саме відповідає таким вимогам. При цьому ефект зміцнення завдяки ТФО може суттєво перевищувати максимальний рівень зміцнення матеріалів, який можна отримувати за допомогою стандартних методів оброблення. Рівень властивостей та якості залежить від параметрів ТФО, хімічного складу матеріалів, їх вихідного стану та інших факторів. Однак це питання є недостатньо вивченим, тому актуальним є експериментальне та теоретичне обґрунтування технології зміцнення сталей різних класів з використанням методу термофрикційного зміцнення (ТФЗ). Важливим є оптимізація режимів ТФЗ, та виявлення факторів, які можуть мати домінуючу роль в процесі оброблення матеріалів. Саме тому робота, яка спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення може бути віднесена до важливих та актуальних. Такі дослідження дозволять отримати чітке уявлення про природу ефекту зміцнення при ТФО з використанням основних положень теорії структурних і фазових перетворень в матеріалах, та сформулювати системний підхід до ТФЗ, як до ефективного методу, що дозволяє забезпечувати зміцнення різного типу виробів.

Мета дослідження: підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин та інструменту із сталей шляхом розробки та використання технологічного комплексу термофрикційного зміцнення (ТФЗ) з можливістю одночасного формування необхідної якості поверхні, та визначення природи і закономірностей процесу зміцнення.

Завдання дослідження:

1. Установити взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу й характеристиками зміцненого шару.
2. Установити вплив ступеня пластичної деформації поверхневого шару на міцність деталей.
3. Визначити рівень залишкових напружень у поверхневих шарах після пластичного деформування.
4. Розрахувати оптимальні технологічні параметри режиму зміцнювального оброблення

Об'єкт дослідження: процес термофрикційного зміцнення (ТФЗ) деталей та виробів із сталей.

Предмет дослідження: підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ

1.1 Методи термофрикційного (ТФО) та поверхнево-деформаційного оброблення (ПДО) матеріалів

Термофрикційні методи оброблення матеріалів відомі та використовуються багато десятиріч. Так, наприклад, термофрикційне оброблення (ТФО) ефективно використовувалося в якості відносно дешевого методу для розрізання довгомірних виробів, починаючи вже з 40 років ХХ сторіччя. В останні роки отримали розвиток методи оброблення матеріалів, засновані на локальному виділенні тепла в різний спосіб. Однак, застосування більшості з них виявляється дороговартісним, що впливає на собівартість продукції. У зв'язку з цим, актуальним є створення та використання маловитратних технологій оброблення матеріалів.

Термофрикційне оброблення (ТФО), як економічний метод оброблення матеріалів сприяє підвищенню продуктивності праці при роботі з вуглецевими, леггованими сталями, чавунами та іншими сплавами. При ТФО використовується круглий інструмент – різальний диск (РД), що має високу стійкість.

Тертя контактуючих поверхонь заготовки та інструменту спричиняє розігрівання та зниженню міцності матеріалу в зоні оброблення. Виготовлення РД з дешевих марок сталей дозволяє заощаджувати дорогі високолеговані інструментальні матеріали. Для ТФО можна використовувати металорізальне устаткування, що випускається верстатобудівною промисловістю без суттєвих змін конструкції. При цьому існують різні підходи до ТФО, як, наприклад, ТФО з вібрацією, при якому створюються умови максимального підігрівання заготовки при мінімальному нагріванні різального диска. Однак, зростання продуктивності механічного оброблення вимагає розширення технологічних аспектів методу термофрикційного оброблення металів і більш ефективної роботи фрикційними дисками з одночасною мінімізацією побічних ефектів таких як, наприклад,

вібрація, що може зменшувати ресурс обладнання, що застосовується. Тому доцільним є вдосконалення подібного інструменту одночасно зі збільшенням його стійкості, підвищенням продуктивності та покращенням умов роботи та якості поверхні, що оброблюється, а також принципів вибору оптимальних режимів оброблення.

В останні роки достатньо широко розглядаються питання, пов'язані з термофрикційним обробленням, та зміцненням матеріалів в такий спосіб, написано багато наукових праць, але в цілому цей процес вивчений не повною мірою у зв'язку з широкою варіативністю умов та засобів реалізації даного процесу.

Е.У. Зарубицький запропонував спосіб оброблення площин і тіл обертання [1]. У якості різального інструмента застосовано різальний диск із гладкою циліндричною поверхнею, у якому позитивно поєднуються переваги круглого обертового інструмента і нагрівання контактних поверхонь тертям.

Так, встановлено, що тертя може використовуватися в якості рушійної сили, як для різання металів, так і для зміцнення поверхневих шарів зі створенням зон нагрівання без руйнування поверхонь тертя із забезпеченням високої чистоти оброблення. Однак, наголошено, що застосування тертя в якості зміцнювального оброблення ще не використовується в повному обсязі у зв'язку з тим, що цей процес вивчений не повністю, а також недостатньо досліджені можливі структури та властивості оброблених поверхонь. Роботи авторів: Зарубицького Е.У., Костіної Т.Н. та ін. розбудовують напрямок оброблення диском тертя [2]. У роботах Покінтелиці Н.І. [3] розширена область застосування дисків тертя. Приділено увагу також термофрикційному зміцненню.

Автор використовував методику експериментального вимірювання температури в деталі що зміцнюється за допомогою термопар, що у свою чергу усереднює температуру в межах розміру термоспаю [3]. Однак, це не дає можливості виміряти реальні температури в тонкому приконтактному шарі порівнянному з розміром термоспаю.

Слід зауважити, що питання щодо можливостей зміцнення матеріалів з

використанням тертя набули високої актуальності. У зв'язку з цим проводиться багато досліджень в цьому напрямку.

1.2 Методи термофрикційного (ТФЗ) та поверхнево-деформаційного зміцнення (ПДЗ) поверхні

Процес підвищення якості поверхні диском, що обертається досліджували багато вчених. Ідея використання тертя для зміцнення неодноразово привертала увагу науковців. Вже в 1967 році в Австрії виданий патент на новий спосіб поверхневого гартування, де у якості інструменту використано швидкообертовий диск із сталі Р18.

Багато досліджень, стосовно зміцнення поверхні тертям, провів Гурей І.В. з групою вчених. У його роботах значна увага приділена технологічним аспектам процесу, точності оброблення, режимам різання, використанню різних змащувальних середовищ. Також вивчалися зміни в поверхневому шарі при різних способах імпульсного фрикційного зміцнення. При цьому був охоплений великий діапазон матеріалів. Розглянуті різні марки сталей та чавунів. Також проведено оцінку температури в поверхневому шарі деталі, що зміцнюється. Однак, при цьому значно спрощений реальний процес, а саме не враховується рух джерела тепла та обмежені розмірні фактори, що може вносити певну похибку в результати дослідження.

Зміцнення тертям чавуну досліджене в роботі [4]. Процес впроваджений при зміцненні напрямних станин верстатів та деталей технологічного оснащення [5], деталей шарнірів приводних і гусеничних ланцюгів конвеєрів [6]. В роботі [7], досліджено вплив реверсивного тертя на якісні показники зміцнення тертям. Вказано, що в разі знакозмінного тертя утворюються більш екстремальні умови для деформування поверхневого шару, що спричиняє збільшення товщини шару в 1,5–2 рази порівняно з деформуванням без реверсу.

Поверхнева твердість також зростає в 1,2–1,4 рази. Однак для ряду деталей

і, особливо, для різального інструменту, штампів і прес-форм важливо забезпечити зміцнення не тільки робочих поверхонь інструмента, а й зміцнення безпосередньо робочої різальної кромки.

У той же час, для краю поверхні умови впливу на неї функціональним диском, а також умови теплообміну з навколишнім середовищем відмінні від ділянок поверхні далеко віддалених від краю. Тому, для керування процесом зміцнення інструментів, необхідно вміти розраховувати температурне поле на краю поверхні, що зміцнюється.

Вивчаючи структуру шару, яка є прилеглою до поверхні тертя, Гурей І.В. із співавторами, відмітили що при фрикційному обробленні висококонцентрований потік енергії утворюється в зоні контакту швидкообертаючого зміцнювального інструмента-диска (60–70 м/с) та оброблюваної деталі. При цьому відбувається одночасне швидкісне зсувне деформування, а швидкість нагрівання досягає 10^5 – 10^6 К/с. Поверхневі шари металу нагріваються до температури вище точки фазових перетворень (Ac_3), а їх охолодження відбувається з великими швидкостями (10^4 – 10^5 К/с) за рахунок відводу тепла вглибину металу. Відмічено, що при високошвидкісному охолодженні фіксується стан, при якому із твердого розчину ще не встигають виділитися окремі фази, або це виділення не встигає повністю завершитися. У поверхневому шарі деталей машин формується специфічний структурно-напружений стан металу – білий шар. Структура білого шару являє собою високодисперсний мартенсит, залишковий аустеніт і дуже дисперсні карбіди [8]. При цьому, відзначалося, що на формування структурно-напруженого стану металу суттєво впливають режими фрикційного оброблення, технологічне середовище, яке використовується в даному процесі, матеріал та форма робочої частини зміцнювального інструмента та інші чинники. Також показано, що при імпульсному фрикційному обробленні армко-заліза у його поверхні формується білий шар. Технологічне середовище, яке застосовується при цьому, суттєво впливає на процес формування зміцненого шару. Відзначалось [8], що при застосуванні в якості технологічного середовища мінерального мастила в зоні контакту, відбувається розкладання його на атомарний вуглець,

який дифундує у поверхневі шари деталі та сприяє формуванню білого шару. При застосуванні в якості технологічного середовища води дифузія вуглецю з технологічного середовища не відбувається. Відзначено, що білий шар також формується, за рахунок можливості дифундування вуглецю з поверхні зміцнювального інструмента. Автори зауважують, що значне підвищення мікротвердості пояснюється насиченням поверхневого шару вуглецем, що відбувається в процесі тертя за рахунок цементиту внутрішніх шарів зразка та дифузії вуглецю з контртіла. Зростання температури та пластична деформація сприяє утворенню аустеніту, який при швидкому охолодженні переходить у мартенсит.

Значний внесок в розвиток фрикційного зміцнення сталі та чавуну зробив Ю. І. Бабей з групою вчених. Метод фрикційно-зміцнювального оброблення (ФРЗО), що розробив Ю. І. Бабей також передбачає використання металевого диска, що обертається зі швидкістю 50–80 м/с [9]. Він спостерігав зміни хімічного складу поверхневих шарів при фрикційно-зміцнювальному обробленні та відмітив, що у білому шарі збільшується вміст вуглецю за рахунок переміщення його із деталей до поверхні. Автор відмітив, що з урахуванням особливих умов впливу на поверхню, це явище не можна пояснити звичайними дифузійними процесами у зв'язку з тим, що час впливу високих температур та тиску на ділянку поверхні дуже малий, та він не перевищує $6 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ с. Наряду зі збільшенням вмісту вуглецю у поверхневому шарі збільшується і вміст таких елементів, як: Cr, Mn, Cu, Si. Без змін залишаються W, Mo, V, а кількість Ni зменшується.

За даними Ю. І. Бабея при термо-зміцнювальному обробленні, коли механічна енергія перетворюється у теплову, спостерігаються високі швидкості нагрівання та охолодження за рахунок відводу теплоти у метал і зовнішнє середовище, які вищі ніж при термічному обробленні [9]. При цьому формується білий шар, товщина якого залежить від швидкості переміщення столу $V_{ст}$. При невеликих швидкостях переміщення ($V_{ст} < 2$ м/хв) відбувається нагрівання поверхневих шарів металу в зоні їх контакту до температури плавлення, що спричиняє зменшення твердості матеріалу, внаслідок чого, частина зміцненого

шару знімається і його товщина зменшується.

Більшість дослідників пов'язують явище зміцнення в таких умовах як з легуванням поверхні, що оброблюється хімічними елементами з середовища в зоні контакту інструмента та заготовки (охладжуюче, змащуюче середовище), так і хімічними елементами з інструменту, або з внутрішніх шарів заготовки в зоні ковзання.

Дослідження фрикційного розрізання [10], які значно розширили розуміння фізики процесу, та дозволили спроектувати ці знання на процес зміцнення з використанням ТФО.

Використання тертя для зміцнення поверхонь описував І. В. Крагельский. Також, була спроба Н. В. Моніна виготовити обертаючий диск з твердого сплаву. При обертанні диска утворювалась теплота, яка розплавляла поверхню та забезпечувала високу чистоту [11].

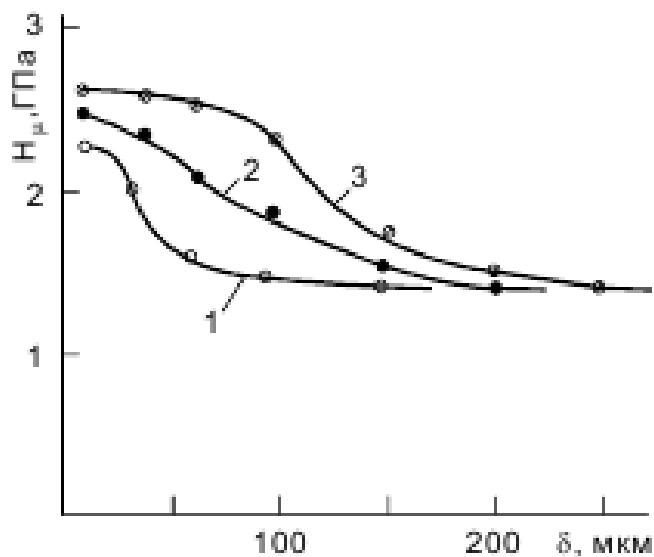
Авторське свідоцтво на спосіб поверхневого зміцнення металевих виробів, при якому використовується тертя між пружною поверхнею та колодками видано В. В. Міхеєву та Н. Н. Сухаріной. Оброблений шар характеризується великою твердістю при малій глибині [12].

При механічному обробленні металів з використанням поверхнево-активних полімервмісних змащувально-охладжувальних засобів у зоні різання протікають складні фізико-хімічні процеси, а саме [13]: адсорбція макромолекул полімеру на поверхні металу, що оброблюються, їх термо- і механодеструкція; утворення макрорадикалів із наступною їх деполімерізацією. В результаті цього, виділяється активний водень та вуглець і насичення інструменту та поверхні, що оброблюється вуглецем; хемосорбція водню на ювенільних поверхнях; утворення хімічних зв'язків на різальних краях інструменту.

Раніше було встановлено, що зі збільшенням зусилля, яке створює інструмент-диск у зоні тертя з поверхнею деталі, майже за лінійною залежністю зростає товщина шару та його твердість. Автори роботи [14] установили, що зі збільшенням тиску на поверхню деталі якісні показники шару зростають. У цих дослідженнях автори використовували подачу на врізання та після встановлення

величини врізання 0,3 мм були змушені припинити збільшення величини подачі на врізання, оскільки була небезпека виходу з ладу шпиндельного вузла.

У роботі [14], показано, що при гартуванні Fe – H і Fe – C – H сплавів при наявності водню знижується температура мартенситного перетворення в залізі та сталях, зменшується критична швидкість охолодження при гартуванні і стає можливим утворення мартенситу навіть у безвуглецевому залізі при звичайних швидкостях охолодження. Зауважено, що аналіз мікротвердості зразків з армко-заліза після фрикційного оброблення із застосуванням різних технологічних середовищ показав (рис. 1.1), що найбільше впливає на формування зміцнених структур застосовувана поверхнево-активна змащувально-охолоджувальна рідина МХО-64а, що у своєму складі містить мінеральне мастило, а також компоненти, які під дією високих температур та тисків розкладаються, активують поверхню, зменшують поверхневу енергію та при цьому ще виділяється активний водень [15]. Показано, що мікротвердість поблизу поверхні найбільша після зміцнення, з використанням МХО-64а. Зі збільшенням глибини вона зменшується і при досягненні глибини 100 мкм і досягає рівня вихідної.



1 – вода; 2 – мінеральне мастило; 3 – МХО-64а

Рисунок 1.1 – Мікротвердість армко-заліза після фрикційного зміцнення з використанням різних технологічних середовищ

Відмічено, [15] що водень спричиняє пластифікування поверхневого шару

металу, що покращує умови протікання його пластичного деформування. При пластичному деформуванні металу водень транспортується рухомими дислокаціями до зеренних зародків субмікротріщин. Субмікротріщини утворюються у вершині скупчення дислокацій, які зупиняються границею зерна. Звільнений з дислокацій водень хемосорбується на поверхнях зародків субмікротріщин і зменшує їх поверхневу енергію [15].

Таким чином автори робіт [15] вказують на потребу застосування спеціальних технологічних середовищ, що має позитивний вплив на показники якості зміцненого шару та, безпосередньо, на технології зміцнення.

На думку Б. А. Костецького, основна ідея зовнішнього тертя полягає в пружно-пластичній деформації, яка обумовлює появу ряду вторинних явищ у зоні контакту, що досліджено недостатньо.

Дослідники [9] не отримали товщину зміцненого шару більше ніж 500 мкм, незважаючи на застосування легувальних елементів, технологічного середовища, реверсу зміцнювального інструменту та інших вдосконалень методу, що наголошено в роботі [16]. Це пояснюється технічними та технологічними можливостями наявного обладнання, що використовувалось для зміцнення. На думку авторів роботи [16], доцільно приділити більше уваги температурі та тиску, що виникають у зоні контакту деталі з інструментом-диском. Підкреслено, що вплив температури та тиску, як основних чинників процесів, що проходять в поверхневих шарах металу під час фрикційного оброблення, вивчені недостатньо. В роботі [16] описано метод, що дозволяє отримати зміцнений шар товщиною до 1,5 мм та зі стабільно високою мікротвердістю (10–11 ГПа) по всій глибині зміцнення. Група дослідників запропонувала установку для поверхневого зміцнення деталей шляхом оброблення високошвидкісним тертям та технологію високошвидкісного тертя. Запропонована установка дає змогу значно розширити діапазон режимних чинників, які впливають на процес високошвидкісного тертя – тиск у зоні контакту, швидкість подачі та інше, порівняно з тими, що використовувались у попередніх дослідженнях. На думку авторів це забезпечує можливість збільшити утворення тепла та забезпечити інтенсивніше

деформування поверхневих шарів матеріалу, яке прогнозовано спричинить підвищення якості зміцненого шару.

Існує багато технологічних методів формування поверхневого зміцнення в металах та сплавах. Так, механо-імпульсне оброблення високошвидкісним тертям, на відміну від інших методів інтенсивного деформування, дає змогу створювати дрібнодисперсні структури на поверхні деталі, виготовленої не тільки з м'яких сталевих матеріалів, а також з високоміцних та тих, що важко деформуються. Деформований шар під час фрикційного зміцнення утворюється безпосередньо на поверхні матеріалу деталі та релаксується на певній глибині. Це відрізняє високошвидкісне тертя від обкочення або ударного зміцнювального оброблення, які ініціюють зони максимального контактного напруження на деякій глибині від поверхні, що може призводити до утворення підповерхневих тріщин.

Очевидно, що використання ТФО в якості саме методу зміцнення є актуальним нині питанням з широкою географією [17 – 22]. Показано, що енергія тертя використовується з різним ступенем інтенсивності та для вирішення різних технологічних питань. Акцентовано увагу, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може використовуватися навіть для зварювання феритної нержавкої сталі [17], мідних листів [18] та інших матеріалів. Показано що при цьому відбувається зміна механічних властивостей по перерізу [19], що пояснюється високотемпературним розігріванням аж до температури плавлення й наступним охолодженням з певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана й деформацією певних структурних складових [20]. Відзначено, що для зміцнення поверхні застосовуються й інші альтернативні джерела, наприклад, плазмове оброблення, що дозволяє змінювати структуру поверхневого шару виробів, що оброблюються [21], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення із застосуванням тертя та інших джерел енергії приводить до утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих білих шарів [22]. Однак досі не існує однакової думки щодо природи та особливостей саме зміцнення при термофрикційно-деформаційних методах оброблення поверхні.

У всіх описаних випадках, на поверхні матеріалу, що оброблюється з'являється білий шар, який ще досі не вивчений в повному обсязі та потребує детального дослідження.

1.2.1 Вплив термофрикційної та поверхнево-деформаційної складової на параметри поверхневого шару сталей

Існує багато поглядів на домінуючі явища при методах зміцнення поверхонь, де використовується термодформаційна складова.

Одним з методів зміцнення поверхні, який дозволяє отримувати поверхневі шари зі зміненими властивостями є електромеханічне оброблення. Так, у результаті впливу електричного струму, високошвидкісного нагрівання та охолодження на поверхні сталі в ході електромеханічного зміцнення формуються треки (внаслідок подачі інструмента) і, в деяких випадках, окремі фрагменти (при імпульсному ЕМО змінним струмом) особливої загартованої структури – білий шар (рис. 1.2).

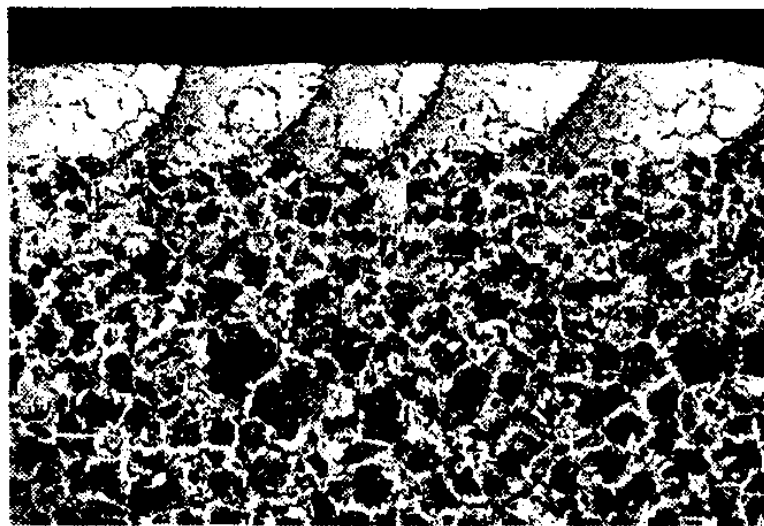


Рисунок 1.2 – Мікрофотографія поперечного шліфа фрагменту з білим шаром на поверхні сталі 45 після ЕМО. $\times 100$ ($\times 2$)

На поверхні нормалізованої й загартованої сталі, зміцненої ЕМО змінним струмом, утворюються сегментоподібні фрагменти структури, що не травляться,

це виглядає як суцільне, однорідне світле поле і не має при цьому характерної для мартенситу голчастої будови – безструктурний мартенсит [23].

Зауважено [24], що аналіз перехідної зони між зміцненим шаром і вихідною структурою (нормалізована сталь) (рис. 1.3) свідчить про формування виразної границі, що відокремлює безструктурний мартенсит від основного металу навіть у межах одного зерна, без ознак виникнення яких-небудь проміжних гартівних структур. Це підтверджує дані про «різкості» гартування – наявності значних просторових градієнтів температури та швидкостей її зміни. Зазначено, що границя між феритно-перлітною структурою та білим шаром нерівна (зубчаста), при цьому вклинювання безструктурного мартенситу в перліт відбувається по цементитним включенням, а вклинені в безструктурний мартенсит виступи утворені феритними ділянками. Це свідчить про більш раннє завершення фазових перетворень в областях, збагачених вуглецем.



Рисунок 1.3 – Мікроструктура перехідної зони білий шар – вихідний метал (нормалізована сталь 45). х 400 (х 2)

Відмічено, що безструктурний мартенсит більш інтенсивно формується замість вихідної структури металу поблизу границь сусідніх зерен і різних структурних недосконалостей, що, імовірно, пов'язано з наявністю тут підвищеного вмісту легувальних елементів і домішок, яких стало більше

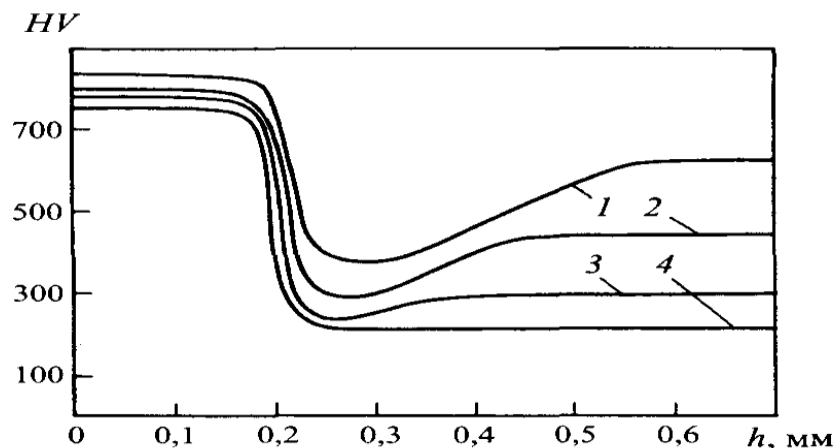
(внаслідок розходження концентрацій вуглецю) градієнтом дифузійних процесів, що полегшують протікання фазових перетворень, а також виникненням температурної неоднорідності (локальних перегрівів) біля міжзеренних границь.

При формуванні безструктурного мартенситу переважними виявляються процеси зародження центрів нової фази. Причиною утворення безструктурного мартенситу є одночасне виникнення великої кількості зародків мартенситу (обумовлене дуже дрібним зерном, концентраційною неоднорідністю й дефектністю структури аустеніту, отриманого в результаті інтенсивного температурно-силового впливу) і відсутність можливості для значного росту цих зародків внаслідок обмеження їхнього росту сусідніми зародками, границями зерен, концентраційною неоднорідністю аустеніту.

Автори показали, що середня мікротвердість зміцненої сталі 45 у порівнянні з вихідною збільшилася в 3,8 рази (для нормалізованої сталі) і в 1,5 рази (для загартованої). Розподіл мікротвердості по товщині зміцненого ЕМО поверхневого шару показані на рис. 1.3. При цьому середня мікротвердість по товщині білого шару залишається практично постійною з різким переходом до твердості вхідної сталі (рис. 1.4).

Авторами [23] також розглянуто деякі особливості структури поверхневого шару зразків попередньо загартованої сталі 45, зміцненої ЕМО. У цьому випадку структура білого шару (безструктурний мартенсит) у загальному аналогічна структурі, отриманої на вихідній нормалізованій сталі, однак відрізняється більшою однорідністю й дисперсністю структури (що, мабуть, викликано більшою однорідністю й дисперсністю вихідної структури загартованого металу). Автори цим пояснюють деяке зростання середньої мікротвердості, її менший розкид, а також меншу травимість (структура світліше) білих шарів, отриманих на загартованій сталі. Навколо кожного фрагменту білого шару, що виникає на загартованій сталі, спостерігається зона зниженої мікротвердості (рис. 1.4, крива 1) і підвищеної травимості – область відпускання при ЕМО, що утворюється внаслідок нагрівання до температур початку інтенсивного розпаду мартенситу деякого обсягу вихідної загартованої структури, що прилягає до зони формування

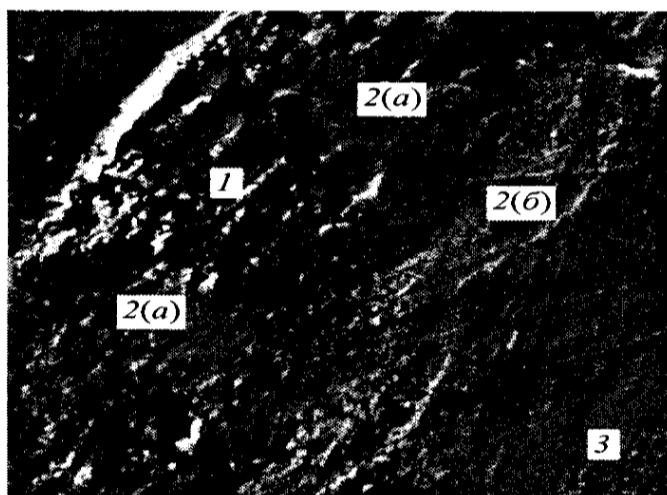
зміцненого фрагмента. Такі ж зони утворюються й при накладенні (зближенні) сусідніх треків білого шару, коли попередня зміцнена доріжка попадає під термічний вплив наступної [23].



1 – гартування без відпускання; 2 – відпускання при 300 °С;
3 – відпускання при 500 °С; 4 – нормалізування.

Рисунок 1.4 – Розподіл середньої мікротвердості HV по товщині загартованого шару сталі 45 (h – відстань від поверхні) після ЕМО

Продемонстровано на знімку (рис. 1.5), отриманому за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ-2000), чітко видно окремі фрагменти білого шару (поз. 1), що становлять зміцнений трек і виникають у результаті імпульсного теплового впливу змінного струму, зазначені вище зони відпускання вихідного загартованого металу (поз. 2(б)), а також зони термічного впливу сусідніх фрагментів безструктурного мартенситу один на одного (поз. 2(а)). При цьому зазначено, що часто (при певних режимах оброблення) такі зони взагалі не утворюються (рис. 1.6). З однієї сторони (ліворуч) від зміцненого треку у вигляді окантовки проходить буртик (валик) металу, появу якого, на нашу думку, можна пояснити гарячою пластичною деформацією, «наволакуванням» матеріалу із зони оброблення на периферію при поперечній (щодо треку білого шару) подачі зміцненого інструмента [23].



1 – безструктурний мартенсит; 2(а) – зона термічного впливу (відпускання) сусідніх фрагментів білого шару один на одного; 2(б) – зона термічного впливу (відпускання) у вихідній структурі; 3 – вихідна структура крупноголчастий мартенсит)

Рисунок 1.5 – Мікроструктура сусідніх фрагментів безструктурного мартенситу й зони термічного впливу на поверхні загартованої сталі 45(х 200) (х 2)



Рисунок 1.6 – Мікрофотографія поздовжнього шліфа фрагменту з білим шаром на нормалізованій сталі 45 (відсутні зони термічного впливу сусідніх фрагментів один на одного) х 100 (х 2)

Розміри зони відпускання у вихідній сталі залежать від її попередньої термічного оброблення. Товщина й твердість цієї зони тим менше, чим вище була

температура попереднього відпускання (проведеного перед ЕМО) вихідної загартованої сталі (рис. 1.4, криві 2, 3). На загартованій попередньо не відпущеній сталі розміри зони відпускання після ЕМО максимальні (рис. 1.4, крива 1). Відпускання безструктурного мартенситу, як більш нерівноважної структури, починається при температурах трохи менших температури початку розпаду звичайного мартенситу, чим, очевидно, і пояснюється деяке збільшення розмірів зони термічного впливу в середині фрагмента білого шару в порівнянні з розмірами цієї області у вихідній структурі (рис. 1.5).

Електронно-мікроскопічний аналіз, а також результати вимірювання мікротвердості в зоні відпускання (рис. 1.4) свідчать про наявність у цій області різних структур, що є продуктами розпаду мартенситу (сорбіт, тростит, мартенсит відпускання), розподіл яких по обсягу розглянутої зони залежить від розподілу температур й її градієнтів.

Показана, що на границі білого шару та зони термічного впливу спостерігається неоднорідна структура. Де окрім безструктурного мартенситу зустрічаються невеликі обсяги з бейнітною і трооститною структурою, отримані при розпаді аустеніту в умовах безперервного охолодження.

На ділянках, прилеглих безпосередньо до границі з білим шаром, спостерігається розпад мартенситу вихідної структури з утворенням сорбіту – феритно-карбідної суміші з карбідами глобулярної форми. У міру віддалення від фрагмента білого шару температура в зоні термічного впливу знижується й на деякій відстані від поверхні з'являється структура троостита відпускання (пластинчаста форма карбідів) з невеликою кількістю відпущеного мартенситу.

На границі зони відпускання з вихідною структурою в основному спостерігається мартенсит відпускання із плавним переходом до вихідної структури.

Крім того існує дві протилежні думки про механізм структуроутворення при інтенсивному пластичному деформуванні (ІХПД). В літературі обговорюється два різних механізми формування структури при ІХПД: дифузійний (Ю. О. Скаков) та бездифузійний (М. А. Штремель).

1.2.2 Вплив ТФО на механічні та фізичні властивості сталей

Відомо, що для забезпечення роботоздатності в складних умовах (абразивні середовища, високі контактні навантаження та ін.), деталей та інструменту використовуються переважно леговані сталі, які є більш дороговартісними ніж вуглецеві. Однак, альтернативні технології зміцнення можуть забезпечити необхідний рівень зміцнення та роботоздатності в більш дешевих вуглецевих сталях.

У результаті фрикційного впливу на поверхні термічно зміцнених вуглецевих і швидкорізальних сталей можуть формуватися нанокристалічні структури, що у ряді випадків забезпечують унікальне поєднання міцності та трибологічних властивостей. Відмічено, що важливою перевагою запропонованого способу є його придатність до виробів практично будь-яких розмірів, підданих як об'ємному, так і поверхневому термічному (наприклад, лазерному) або хіміко-термічному обробленню. Зауважено, що переведення сталей в нанокристалічний стан може супроводжуватися вагомим покращенням їх трибологічних властивостей. Зростання зносостійкості та зниження коефіцієнтів тертя низьковуглецевих сталей досягається наноструктуруванням їх поверхні з використанням механічного оброблення SMAT (surface mechanical attrition treatment), під час якої в процесі впливу металевими кульками з ультразвуковою частотою у вакуумі поверхня, яка оброблюється піддається не тільки ударному навантаженню, а й тертю ковзання – при зіткненні кульок з поверхнею під різними кутами [24 – 25]. Наноструктурування (до середнього розміру зерен ~ 16 нм) поверхневого шару середньо-вуглецевих сталей в умовах бомбардування сталевими частинками у швидкісному повітряному потоці спричиняє зниження зносу і коефіцієнта тертя в умовах тертя ковзання на повітрі в порівнянні з вихідним станом сталі – після її гартування і високого відпускання [26]. Підвищення трибологічних характеристик при подрібненні зерна пояснюється зростанням твердості, дифузійної активності поверхні та, відповідно, її здатності формувати захисний оксидний шар. Сталевий дріт з високовуглецевої перлітної сталі, в якій після інтенсивного холодного деформування відбулося розчинення

цементиту та наноструктурування фериту, має більш високу абразивну зносостійкість у порівнянні з високохромістими чавунами [27].

У ряді робіт відзначається неоднозначний і навіть негативний вплив наноструктурування сплавів заліза і сталей на зносостійкість. Так, після оброблення SMAT шарикопідшипникової сталі в стані поставки максимальна зносостійкість в умовах сухого тертя ковзання спостерігається при середньому розмірі зерна 32 нм, коли досягається оптимальне поєднання міцності та пластичності поверхневого шару [28]. Формування ж наддрібного (8 нм) зерна не підвищує зносостійкість сталі внаслідок значної крихкості нанокристалічного шару. Низькою пластичністю нанокристалічного стану обумовлений підвищений знос в умовах сухого тертя ковзання об'ємно наноструктурованого литого заліза з розміром кристалітів 50–89 нм у порівнянні з крупнокристалічним (розмір зерна ~ 50 мкм) залізом [29]. Наноструктурування поверхні сталі Гадфільда дробоструминним обробленням збільшує опір зношуванню відносно м'яким незакріпленим абразивом (склом), проте не має позитивного впливу на зносостійкість при зношуванні по закріпленому абразиву більшої твердості (корунду) [30]. Вивченню зносостійкості нанокристалічних шарів, сформованих інтенсивним пластичним деформуванням на поверхні термозміцнених високовуглецевих сталей, приділялася істотно менша увага. Приведені шари поряд з великою твердістю мають підвищену стійкість до термічного знеміцнювання, включаючи тривалі (до 20 год) витримки при 350–550 °С. У зв'язку з цим значний науковий і практичний інтерес становить дослідження опору сталей, зміцнених фрикційним обробленням, різним видам зношування, у тому числі тепловому захоплюванню, яке розвивається внаслідок тертя з підвищеними швидкостями ковзання.

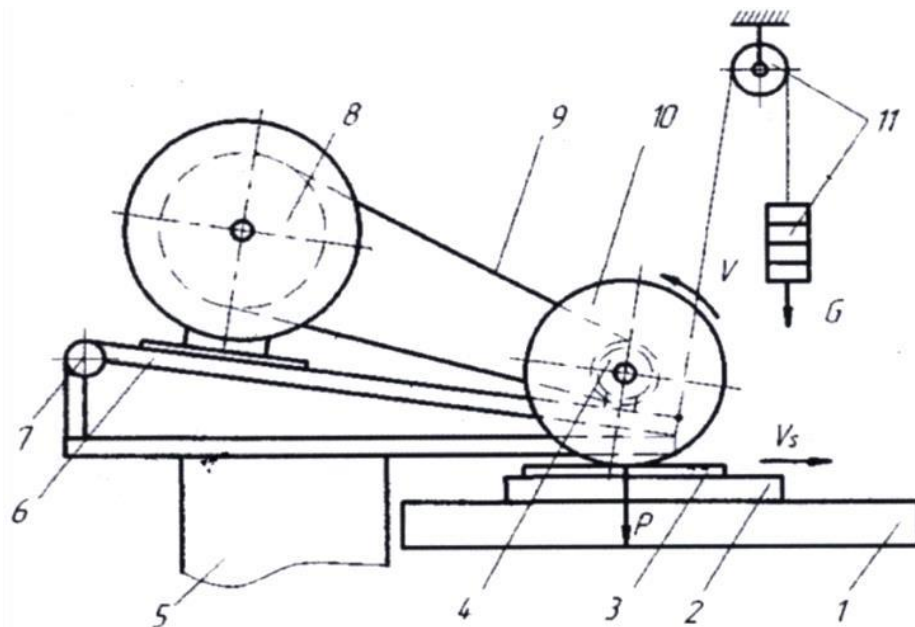
Принципово новий зміцнювальний інструмент – диск для фрикційного оброблення, який оснащений пальцями з матеріалу, що має коефіцієнт теплопровідності вищий, ніж матеріал диска. В разі використання цього диска товщина шару підвищується в 1,5 рази.

Аналіз наведених вище робіт дозволив сформулювати уявлення про

механоімпульсне зміцнення високошвидкісним тертям. Але, більшу увагу доцільно приділити саме базовим основам виникнення шару з високими фізико-механічними показниками, що утворюється внаслідок фрикційного оброблення.

В роботі А. Є. Рудь [31] описано установку для фрикційного зміцнення (рис. 1.7), яка дає змогу створювати зусилля в зоні тертя до 1000 Н і більше.

Аналіз технології зміцнення [9] вказує на те, що для створення тиску в зоні контакту переважно використовували подачу на врізання. На нашу думку, простіше та ефективніше рішення – застосувати важільну систему створення тиску в зоні зміцнення.

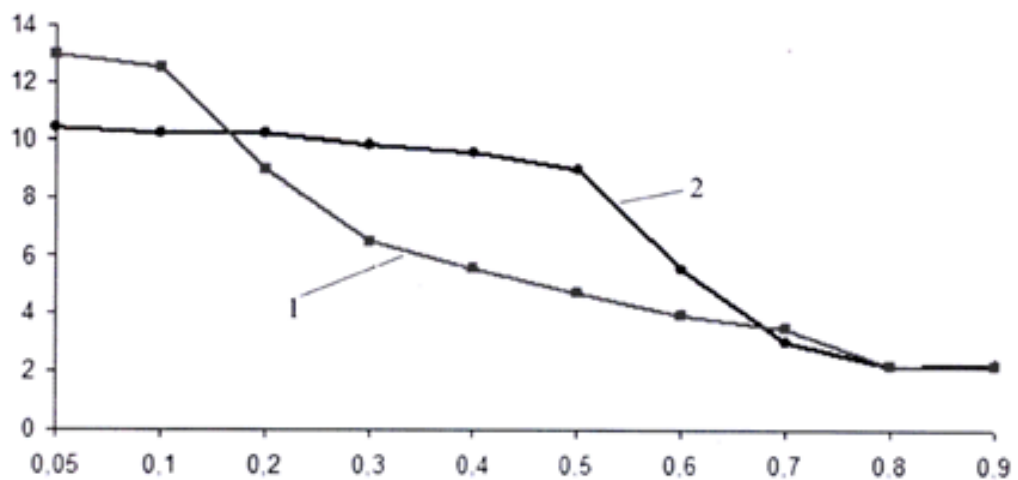


1 – стіл універсально-загострювального верстата; 2 – магнітна плита; 3 – деталь;
4 – шпindel; 5 – колона; 6 – поворотна плита; 7 – шарнір; 8 – електродвигун
приводу диска; 9 – клинопасова передача; 10 – інструмент-диск; 11 – механізм
створення зусилля

Рисунок 1.7 – Принципова схема установки

На установці здійснювалося дослідження впливу зусилля притискання на товщину зміцненого шару. Результати експерименту вказують на те, що існує чітка кореляція між товщиною зміцненого шару та величиною деформацій у ньому. Так, внаслідок сухого тертя титановим диском по сталі 45 шириною

зміцнення 4 мм та встановленому зусиллі притискання 450 Н отримали шар товщиною 600 мкм з середньою мікротвердістю 9,5 ГПа. Варто відзначити, що у разі створення великих зусиль, а як наслідок – і деформацій, утворюється шар, який характеризується стабільно високою мікротвердістю по всій глибині зміцнення. Шар глибиною 600 мкм було також отримано в роботі [9], але висока твердість шару (до 13 ГПа) мала місце тільки на перших 100 мкм від поверхні, а далі спостерігалось зменшення твердості (рис. 1.8).

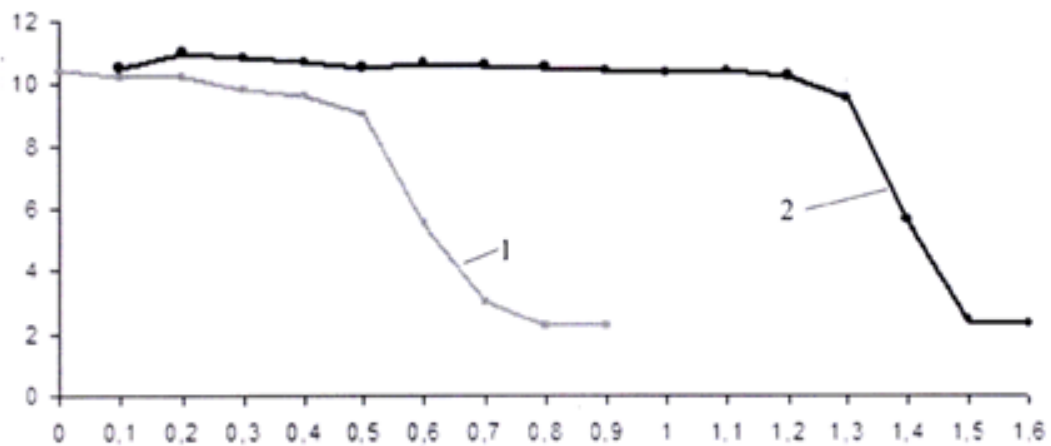


1 – дані роботи [54]; 2 – наші дослідження

Рисунок 1.8 – Графік порівняння мікротвердості та глибини шару, отриманого в наших дослідженнях та даних роботи [20]

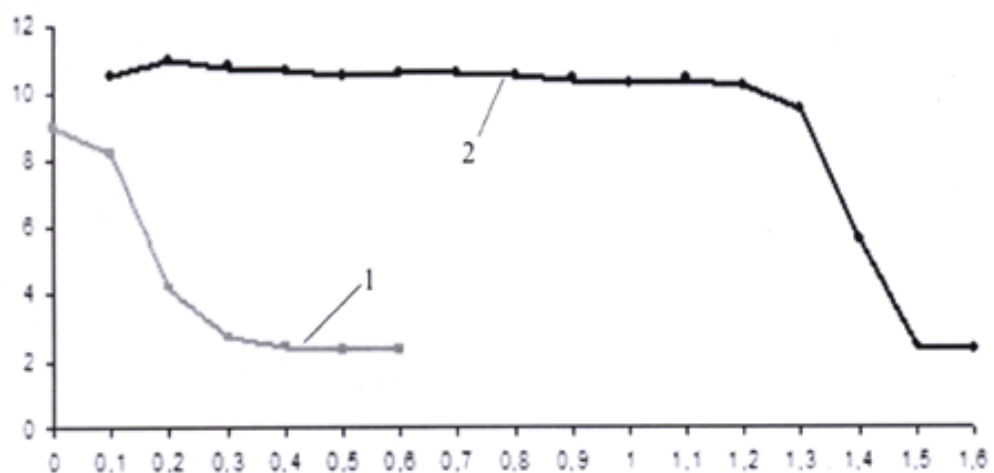
Значний вклад в розвиток питань фрикційного оброблення матеріалів зробив проф. М.Д. Кірик [32, 33]. Одним з ключових питань було дослідження впливу напрямку руху інструмента-диска на якісні показники зміцненого шару. Встановлено, що значну роль у зміцненні відіграє саме напрямок обертання зміцнювального диска відносно до напрямку подачі. Так, за однакових режимних чинників зміцнення (матеріал зразка – сталь 45; диск з титанового сплаву; ширина контакту – 4 мм; зусилля – 450 Н; кругова швидкість диска – 68 м/с; швидкість подачі – 0,5 м/хв; сухе тертя). Товщина шару у разі попутної подачі була в 2 рази більша, ніж у разі зустрічної (рис. 1.9). Попутне фрикційне зміцнення, як показали дослідження, також характеризується меншою величиною усадки матеріалу. За

умов, описаних вище, усадка під час попутної подачі становила 0,09 мм проти 0,55 мм у разі зустрічної. Зауважено, що зі зменшенням зусилля до 50 Н та ширини контакту до 4 мм (диск з титанового сплаву, без мастильно-охолоджувального середовища) товщина шару становить менше 200 мкм (рис. 1.10) та відмічено, що напрямок обертання зміцнювального диска відносно напрямку подачі істотно впливає на параметри зміцненого шару [33].



1 – зустрічний напрямок; 2 – попутний напрямок

Рисунок 1.9 – Графік мікротвердості Нм та товщини шару h залежно від напрямку обертання інструмента-диска відносно напрямку подачі



1 – 50 Н; 2 – 450 Н

Рисунок 1.10 – Графік мікротвердості та товщини шару залежно від зусилля в зоні контакту

1.2.3 Вплив хімічного складу сталей на параметри поверхневого шару при ТФЗ

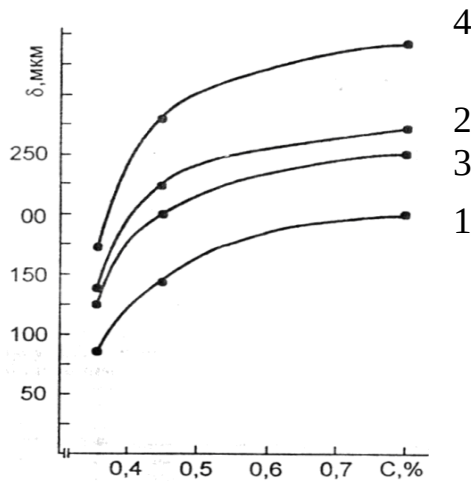
Зауважено, що при звичайному гартуванні фіксується певний нерівноважний стан металу і відповідна структура, а при високошвидкісному охолодженні часу для формування таких структур і фаз недостатньо. У результаті такого охолодження фіксується стан, при якому із твердого розчину ще не встигають виділитися окремі фази або це виділення не встигло повністю завершитися.

Вміст вуглецю в мартенситі значно більший концентрації, яка відповідає точці мартенситного перетворення. При цьому формуються дві якісно різні структурні зони – зона вторинного гартування або так званого слаботравимого білого шару і зона підвищеної травимості або зона термічного впливу зі структурою високошвидкісного відпускання, які суттєво відрізняються по своїх фізико-механічних і електрохімічних властивостях від основного металу. Структура білого шару представляє собою високодисперсний мартенсит, залишковий аустеніт і дуже дисперсні карбіди [21].

Показано, що технологічне середовище і форма робочої поверхні диска, хімічний склад та його термодинамічний стан суттєво впливають на товщину зміцненого шару та мікротвердість його після фрикційного зміцнення сталей.

При зміцненні сталі 20, яка має низьку твердість, у нормалізованому стані із застосуванням в якості технологічного середовища мінерального мастила білий шар формується тонкий, товщиною не більше $\delta = 30\text{--}40$ мкм. При застосуванні МХО-64а товщина білого шару різко зростає і складає $S = 90\text{--}100$ мкм, він отримується рівномірним по всій довжині. Така ж картина спостерігається при зміцненні сталі 45 в загартованому і низько-відпущеному стані.

Товщина білого шару, отриманого при фрикційному зміцненні сталі 45 із застосуванням мінерального мастила складає $\delta = 130\text{--}150$ мкм, а із застосуванням МХО64а – збільшується до $\delta = 200\text{--}220$ мкм (рис. 1.11).



1 і 3 – зміцнення з використанням мінерального мастила; 2 і 4 – з використанням МХО-64а (гартування і низькотемпературне відпускання) після фрикційного зміцнення диском гладкою (1, 2) та з нарізаними поперечними пазами (3, 4) на робочій частині

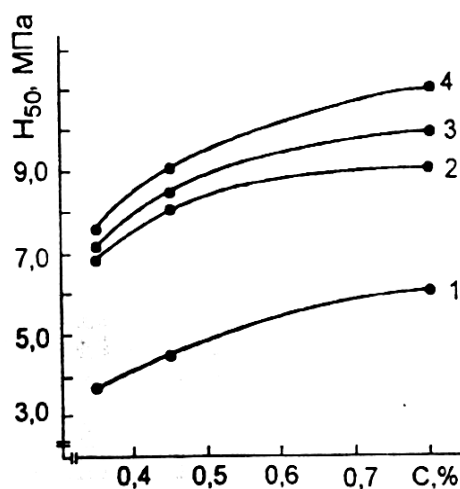
Рисунок 1.11 – Залежність товщини білого шару від вмісту вуглецю у сталі

Мікротвердість білого шару, отриманого на сталі 20 при зміцненні диском з гладкою робочою частиною із використанням МХО-64А, складає $H_{\mu}=4,6\text{--}4,8$ ГПа, при застосуванні мінерального мастила – тільки $H_{\mu}=3,2$ ГПа проти $H_{\mu}=2,6$ ГПа основної структури. При фрикційному зміцненні сталі 45 із використанням МХО-64а мікротвердість білого шару також вища в порівнянні із застосуванням при зміцненні мінерального мастила і складає $H_{\mu}=8,6$ ГПа проти $H_{\mu}=8,1$ ГПа відповідно, при мікротвердості основної структури – $H_{\mu}=4,7$ ГПа (рис. 1.12) [21].

Зі збільшенням кількості вуглецю в сталі якість зміцненого шару значно покращується. Найбільш якісний зміцнений шар був отриманий на евтектоїдній сталі У8А, як у загартованому і низько-відпущеному, так і загартованому і високо-відпущеному станах. Як показали металографічні дослідження зразків із загартованої та високо-відпущеної сталі У8А після фрикційного зміцнення, товщина зміцненого шару досягає $\delta = 100\text{--}120$ мкм.

Автор відмічає, що утворений білий шар однорідний, мікротвердість його досягає $H_{\mu}=9,1$ ГПа проти $H_{\mu}=3,6$ ГПа вихідної структури. Гартування і низькотемпературне відпускання збільшує товщину білого шару до $\delta = 200\text{--}220$

мкм. Використання диска з нарізаними поперечними пазами на робочій поверхні ще суттєвіше підвищує як мікротвердість так і товщину білого шару.



1 – вихідна структура; 2 – зміцнення з використанням мінерального мастила; 3 – зміцнення з використанням МХО-64а; 4 – зміцнення з використанням МХО-64а та нарізаними поперечними пазами на робочій частині диска

Рисунок 1.12 – Залежність мікротвердості білого шару від вмісту вуглецю в сталі після фрикційного зміцнення

Так, на сталі У8А у загартованому і низько-відпущеному стані після фрикційного зміцнення диском з поперечними пазами на робочій частині та використанням як технологічне середовище МХО-64а товщина білого шару зростає до $\delta = 320 - 350$ мкм, мікротвердість до $H_{\mu} = 11,1$ ГПа.

Також показано, легування сталі хромом, нікелем (в інтервалі 1–3 %), або хромом і нікелем, сприятливо впливає на якість білих шарів. Хром у таких кількостях збільшує прогартовність сталі, нікель сповільнює аустенітні перетворення, зменшує зв'язок заліза з вуглецем і сприяє більш рівномірному розподілу вуглецю в металі.

Товщина білого шару при зміцненні з використанням мінерального мастила на загартованій і високо-відпущеній сталі 40ХН досягає $\delta = 150 - 170$ мкм, на загартованій і низько-відпущеній – $\delta = 190 - 200$ мкм (рис. 1.13). При зміцненні з

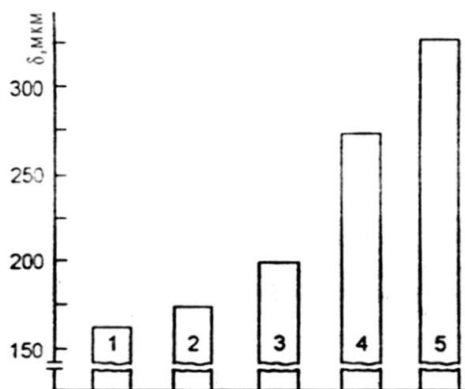
використанням МХО-64а товщина білого шару зросла до $\delta = 250\text{--}270$ мкм. На якість білих шарів впливає також і марганець.

Так, після фрикційного зміцнення у поверхневих шарах зразків із загартованої і середньо-відпущеної сталі 65Г виникає «білий шар» товщиною $\delta = 180\text{--}200$ мкм, мікротвердість якого у 2,5–2,6 рази більша за вихідну структуру.

Застосування в процесі фрикційного зміцнення МХО-64А та диска з нанесеними поздовжніми пазами на його робочій частині сприяють збільшенню товщини білого шару, його мікротвердості, а також збільшується зона відпускання із пониженою твердістю.

Зона підвищеної травимості (пониженої твердості) утворюється в результаті відпускання підповерхневого шару металу. У цьому шарі металу градієнт концентрації енергії різко знижується і відбувається нагрівання до температур нижче точки фазових перетворень. Внаслідок цього відбувається місцеве високе відпускання попередньо загартованого і низько-відпущеного металу.

При зміцненні незагартованого металу (після відпалювання, нормалізації) зона підвищеної травимості не спостерігається.



1, 2 – гартування і високе відпускання; 3, 4, 5 – гартування і низькотемпературне відпускання) після фрикційного зміцнення з використанням мінерального мастила (1, 2) та МХО-64а (3, 4, 5)

Рисунок 1.13 – Товщина білого шару, отриманого на сталі 40ХН

Автор підкреслює, що підвищення метастабільності структури металу,

збільшення вуглецю у сталі та легування нікелем, хромом, марганцем та іншими карбідоутворюючими елементами сприяє покращанню умов утворення білих шарів. Однак, навіть при отриманні високого рівня механічних характеристик в поверхні деталей, що зміцненні тертям важливу роль в їх експлуатаційній стійкості відіграє саме якість поверхні після зміцнення.

Дослідження вчених ХНТУСГ ім. Петра Василенка, щодо відновлення наплавленням поверхонь та їх зміцнення спеціальним механічним обробленням і вивчення напруженого стану поверхневих шарів деталей показали, ефективність наплавлення в комплексі із зміцнюючим заточуванням. При цьому приділялась увага впливу деформації та зафіксовано збільшення зміцненого шару до 55 мкм і формування деформаційного безструктурного мартенситу, з підвищенням мікротвердості в 1,8–2 рази з наявністю залишкових напружень стискання в поверхневому шарі [34].

Групою дослідників під керівництвом О. В. Манько вивчалось утворення білого шару при фрикційно-зміцнювальному обробленні тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту. Показано [35], що сталь У8А, яка може використовуватися для даного інструменту має високі показники зносостійкості. Проводилось варіювання режимів зміцнення, що дозволило отримати мікротвердість зміцненого шару 5 – 11 ГПа. В даній роботі відмічено, що структура білих шарів являє собою механічну суміш мартенситу та залишкового аустеніту і має високу в'язкість при достатній твердості. Також підкреслено, що природа утворення таких структур недостатньо зрозуміла незважаючи на велику кількість проведених досліджень.

В своїх дослідженнях, щодо можливості виготовлення дереворізальних ножів з конструкційних сталей та зміцнення їх високошвидкісним тертям Ю. Р. Капраль наголошує, що концентрація вуглецю повинна становити не менше 0,4 %. Автор відмічає [36], що найкращих показників фізико-механічних властивостей зміцненого шару можна досягти у разі використання важільної системи навантаження та шарнірного закріплення інструмента-диска з титанового сплаву під час високошвидкісного зміцнювання в технологічному середовищі

повітря із застосуванням попутного напрямку обертання інструмента-диска відносно напрямку подавання ножа. Найбільший вплив на якісні показники зміцненого шару відіграють швидкість подавання ножа та сила притискання інструмента-диска до ножа. У разі використання важільної системи навантаження та шарнірного закріплення інструмента-диска для сталі 45 отримано максимальне значення мікротвердості 14 ГПа, а для сталі 65Г – 14,6 ГПа, при товщині шару, яка перевищує 1 000 мкм.

Щодо зміцнювального інструменту, вважається, що матеріал зміцнювального диска повинен мати найменшу спорідненість з матеріалом заготовки, що оброблюється. На підставі аналізування теплофізичних процесів в області контакту інструмент – заготовка при високошвидкісному терті, з урахуванням досвіду експлуатації металевих дисків, визначений перелік сталей, які широко використовуються у промисловості, та випробувані при високих швидкостях ковзання [1]. Відоме застосування для виготовлення металевих дисків сталей, які леговані молібденом, вольфрамом, титаном. Однак помітного збільшення стійкості не відмічено, у зв'язку з чим використання таких дисків обмежено. У процесі оброблення металевими дисками на їх поверхні утворюються нарости за рахунок захоплювання (адгезії). Якщо при обробленні чи розрізанні площин металів таке явище може сприяти процесу, оскільки нарости відіграють роль різальних зубів, то зміцнення доцільно вести за відсутності захоплювання і наростоутворення, щоб зменшити труднощі з призначенням припусків на оброблення. Крім того, поверхня після оброблення може мати високий рівень шорсткості.

Слід зауважити, що основні задачі дисертаційної роботи направлені на розробку технологічних аспектів ТФЗ для підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту з одночасною мінімізацією витрат на проведення процесу зміцнення. Виходячи з цього при виборі матеріалу для зміцнювального диска була обрана сталь Ст3. Така марка сталі має низьку спорідненість з матеріалами, що досліджуються в даній роботі і поширені в промисловості, як конструкційні й інструментальні матеріали. До того ж, сталь Ст3 є недорогим широко

розповсюдженим матеріалом, а низький вміст вуглецю в данному випадку може розглядатися як перевага, з точки зору напруженого стану в інструменті який може виникати в процесі термофрикційного зміцнення (ТФЗ). Що стосується геометричних параметрів інструмента – зміцнювального диска, то була обрана максимально проста конфігурація з меншими, порівняно з описаними дослідниками вище, габаритами диску. Це пояснюється таким:

1) Об'єкти зміцнення, що розглядаються в даній роботі, не вимагають високої товщини і великого діаметра зміцнювального диска.

2) Зменшення товщини даного інструмента дозволяє суттєво збільшити локальний вплив диска на заготовку в місці контакту (як термічний, так і деформаційний). Цей крок дозволяє використовувати для зміцнення верстат з меншою потужністю, що робить процес ТФЗ більш привабливим.

3) Зміцнення таким інструментом дозволяє трохи знизити жолоблення заготовок, що може виникнути при ТФЗ.

1.3 Висновки до розділу

1. Показані різні підходи та можливості зміцнення поверхонь з використанням методів, які включають тертя. Проаналізовані схеми устаткування для поверхневого зміцнення матеріалів. Так, диск для зміцнення може бути закріплений до шпинделя (вертикально-фрезерного, горизонтально-фрезерного) верстата за типом торцевих фрез. Також диск може бути встановлений на шпинделі установок або приставок до металорізальних верстатів, призначених для проведення оброблення зміцнювальним диском.

2. До кінця не встановлена природа ефекту зміцнення при ТФО. Нема чіткої уяви щодо впливу різних зовнішніх та внутрішніх факторів (складу та стану сталі, яка зміцнюється, технологічних параметрів та ін.) на ефект зміцнення.

3. Недостатньо широко розкрито питання напруженого стану в поверхні, що оброблювалася, а відповідно, постає питання про доцільність проведення завершального термічного оброблення, що як правило необхідно для безпечної експлуатації зміцнених виробів.

4. Більш детального аналізування потребують як макро- , так і мікроструктурні зміни, що мають місце при ТФО. В даному аспекті є необхідність чіткого формулювання характеру та природи змін, які ініціюють високий ступінь зміцнення. Для цього доцільно необхідні застосувати комплексні металографічні підходи з використанням електронної мікроскопії.

5. Основним питанням щодо макроструктурних змін є якість поверхні після ТФО, оскільки саме чистота поверхні у вигляді її шорсткості визначає роботоздатність деяких виробів з посиленням на зв'язок якості поверхні з теплофізичними проявами при їх експлуатації.

6. Нема достатньої кількості даних про вплив ТФО на можливість отримання наноструктур у поверхневому шарі, що оброблювався.

Таким чином слід зауважити, що детальне розуміння описаних вище питань дозволить визначити природу зміцнення при ТФО і, що особливо важливо, зробить процес ТФО передбачуваним, тобто дасть змогу керувати як зміцненням, так і якістю поверхні при ТФЗ.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Вибір методів ППД

Розглянемо існуючі методи ППД, які могли б задовільнити експлуатаційним вимогам заданих деталей.

Вибір методу та інструменту ППД можна здійснювати за наступною схемою:

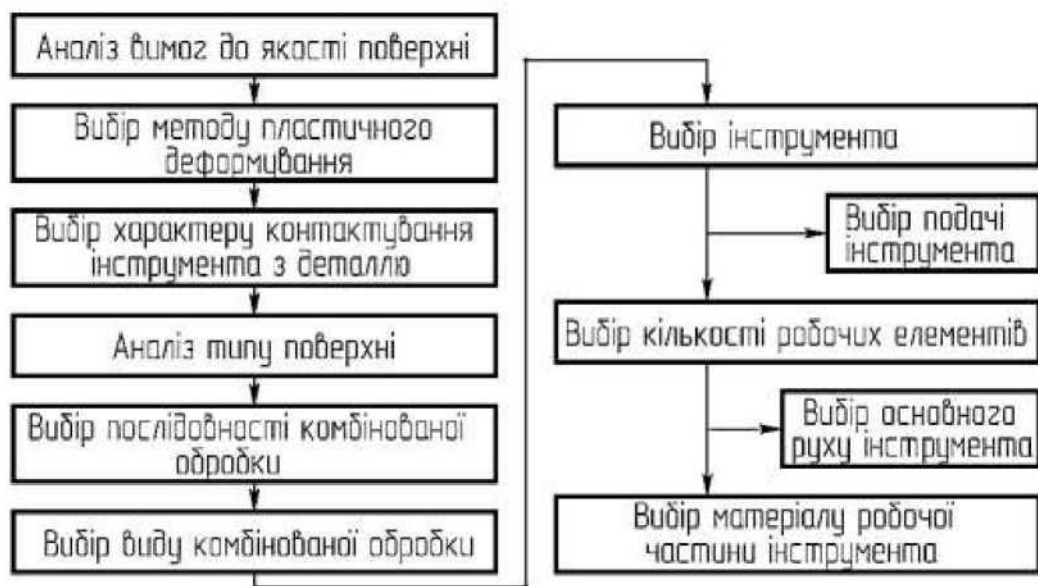
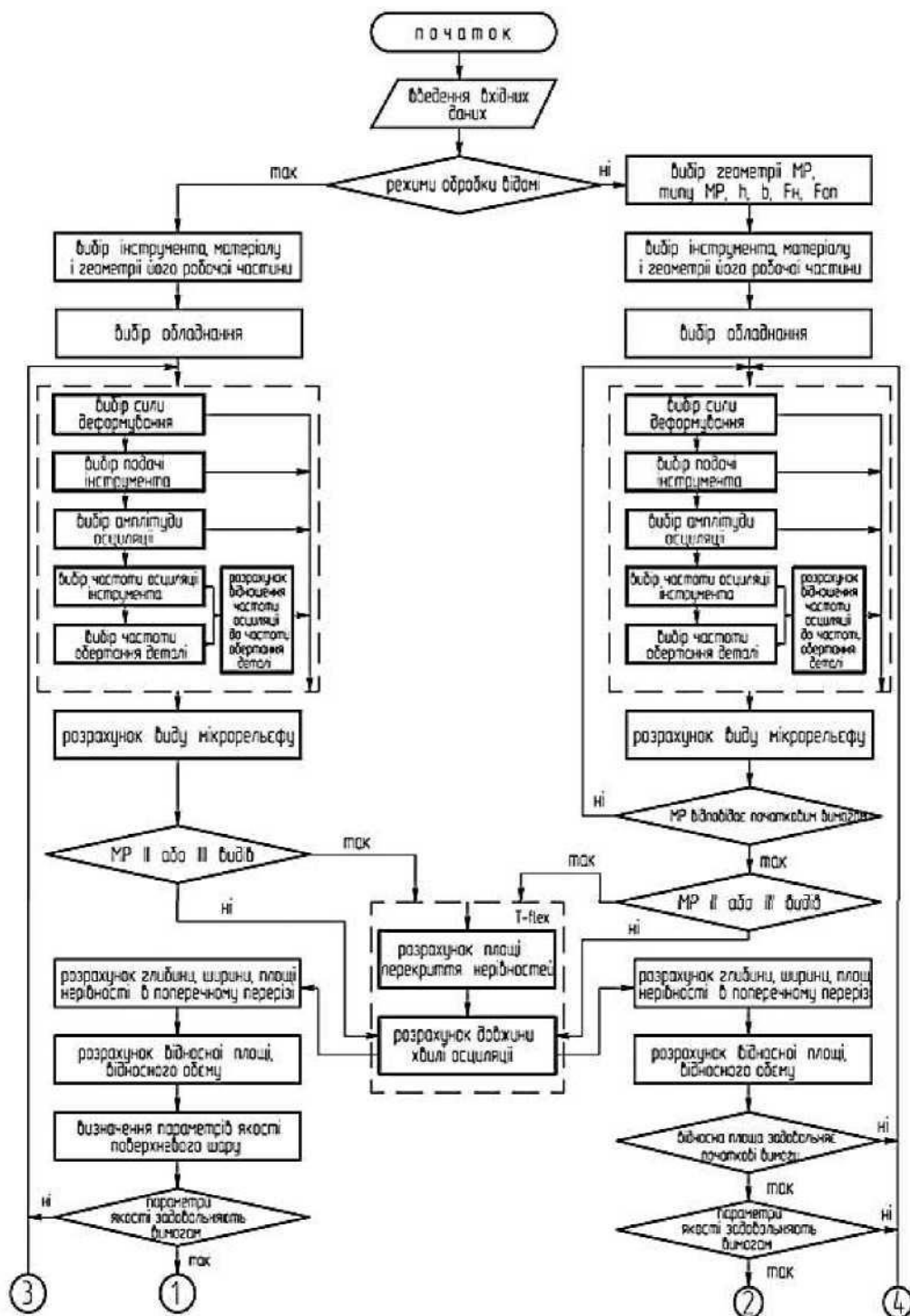


Рисунок 2.1.- Алгоритм вибору способу обробки

Для покращення процесів обробки операції пластичного деформування можна поєднувати з попередніми операціями різання або комбінувати різні способи ППД для отримання кращих характеристик. Як інструменти при фінішних операціях, що здійснюються шляхом різання і є попередніми до пластичного деформування в промисловості можна використовувати: фрези, шліфувальні круги, різці. Як інструменти для ППД можна обирати вигладжувачі різної форми, кульки, ролики, бойки, дорни, з одним або кількома робочими елементами. Існують методи комбінованої обробки, при яких поєднуються в собі ППД як один з елементів. Їх можна поділити наступним чином: комбіновані способи власне ППД, ППД з випереджаючим різанням, ППД, яке випереджає

процеси різання, при цьому спосіб контакту між інструментом і деталлю пружним або жорстким. Проаналізувавши методи ППД розробили алгоритм за яким можна обрати саме комбіновану обробку. Алгоритм представлений на рисунку 2.1 та на рисунку 2.2 представлено загальний алгоритм за яким можна керувати процесом формування експлуатаційних властивостей та якості самої поверхні при комбінованих процесах обробки.



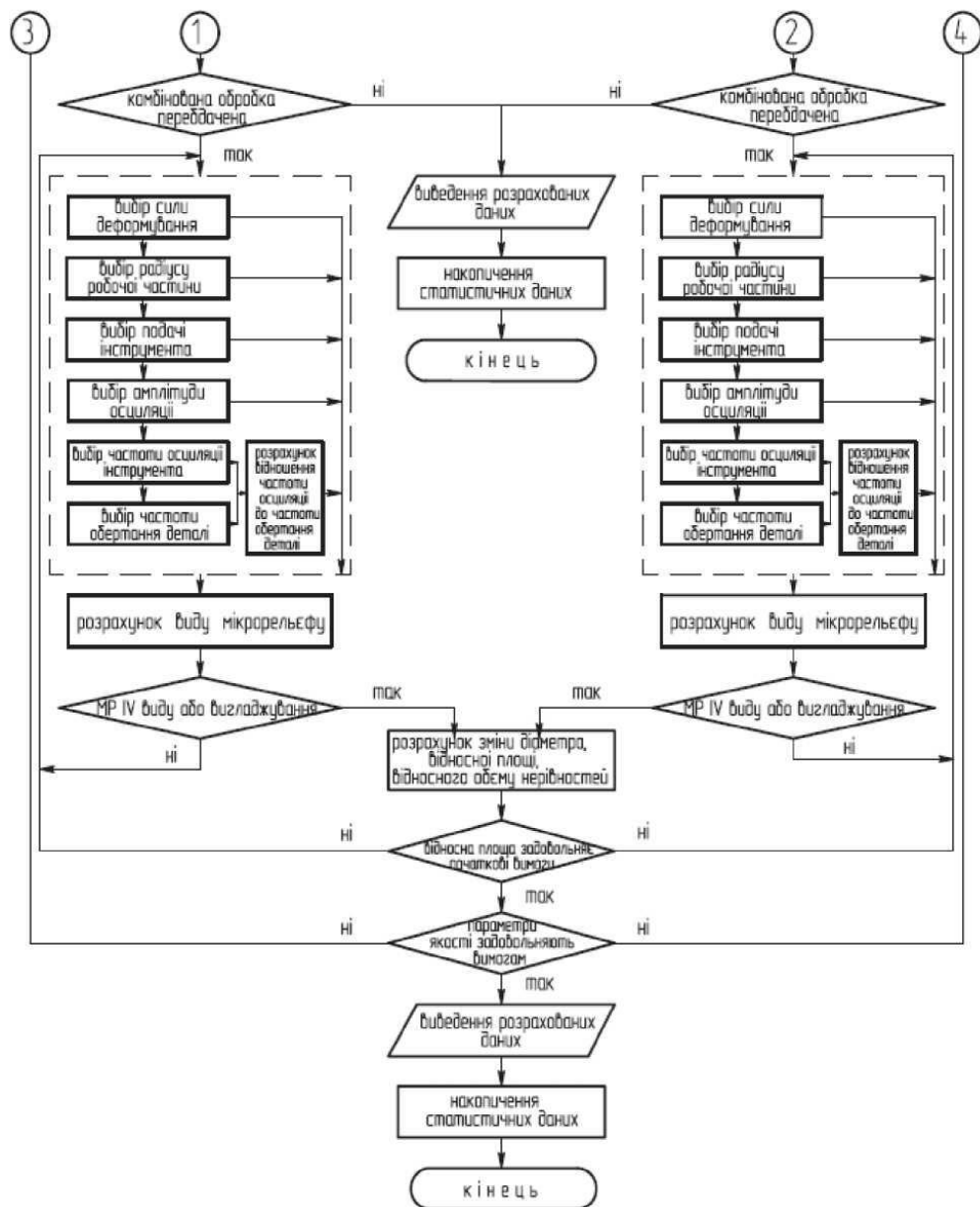


Рисунок 2.2. – Алгоритм керування процесом формування експлуатаційних властивостей та якості поверхні

2.1 Охоплююче поверхневе пластичне деформування

Аналіз на технологічність довгомірних мало жорстких виробів показав, що в деяких випадках для виготовлення деталей машин доцільно використовувати способи обробки металів тиском (ОМТ), які можуть бути реалізована на трьох стадіях технологічного процесу: заготівельної, формоутворюючої і обробної.

Використовуючи металургійні процеси волочіння і калібрування, можна отримувати заготовки максимально наближені за формою і розмірами до готових деталей.

В умовах машинобудівного виробництва заготовки можуть бути доведені до форми готових деталей при використанні, наприклад, процесу редукування через жорстку матрицю. Остаточно задані розміри деталей, якість поверхні і напружено-деформований з стояння поверхневого шару можна отримати ППД, що дозволяє сформувати високу якість поверхневого шару.

Однак при зміцненні довгомірних і мало жорстких циліндричних деталей можливості існуючих локальних методів зміцнення значною мірою вичерпані: при обмеженій продуктивності вони не забезпечують необхідну точність діаметральні розмірів і стабільності геометричної форми. Для зміцнення деталей зазначеного типу доцільний відхід від традиційних схем обробки. Як перспективний напрям запропонований спосіб охоплюючого поверхневого пластичного деформування (ОППД), який реалізує схему осесиметричного навантаження на обмеженій ділянці виробу. Спосіб відрізняється високою продуктивністю і дозволяє змінювати характеристики формованого поверхневого шару в широких межах.

Пластичне деформування при осесиметричному навантаженні має в деяких випадках явні переваги в порівнянні з локальними методами поверхневої пластичної обробки:

- висока продуктивність процесу за рахунок великих швидкостей деформування;
- забезпечення стабільності діаметрального розміру по довжині заготовки і значне зменшення похибки вихідного розміру;
- отримання заданого розміру за один прохід при припусках, що перевищують на порядок і більше припуски, що встановлюються для поверхневого пластичного деформування;
- шорсткість зміцнених поверхонь порівнянна з шорсткістю, що має місце при фінішних операціях.

Кінематична простота ОППД, коли обробка здійснюється лише за рахунок осового переміщення заготовки або інструменту, привертає увагу і виробників. Однак реалізувати такий принцип обробки вдається не завжди і не відразу – обриви, тріщини, розшарування, викривлення і інші дефекти свідчать про те, що уявна простота процесів є вдаваною.

Реалізувати цю технологію можна двома способами: охоплює деформування за схемою стиснення (рисунок 2.3, а) і охоплює деформування за схемою розтягування заготовки (рисунок 2.3, б).

Як деформуючий інструмент при цьому використовують кільцевий індентор – матрицю. Робочі деформуючі інструменти (фільери, волоки, матриці) складаються з трьох основних частин: робочої, що має форму усіченого конуса, калібрує (циліндричної) частини і вихідний частини у вигляді зворотного конуса.

При практичній реалізації запропонованих процесів пластичного деформування виникає ряд нових проблем. Одна з них відноситься до виявлення напружено-деформованого стану оброблених виробів. Практика ОМД показує, що в деяких випадках холоднодеформовані вироби отримують тріщини, які призводять до руйнування матеріалу (рисунок 2.4).

Визначення напружено-деформованого стану (НДС) в осередку деформації є ключовим питанням для розуміння сутності технологічного процесу і виявлення чинників, що впливають на якість і експлуатаційні характеристики деталей машин і вироби в цілому. Напружений стан пружно-пластичного матеріалу в осередку деформації є основною інформацією для визначення за результатами розвантаження залишкових напруг.

На основі теорії малих пружно деформацій і методу скінченних елементів побудована математична модель процесу охоплює зміцнення, що дозволяє визначати поточне і залишкове напружено-деформований стану в довільній точці навантаженого осесиметричного тіла. Достовірність запропонованої моделі зміцнення підтверджена відомим аналітичним рішенням (завдання Ламі) і експериментальними результатами по деформованому і залишковим напруженим станам.

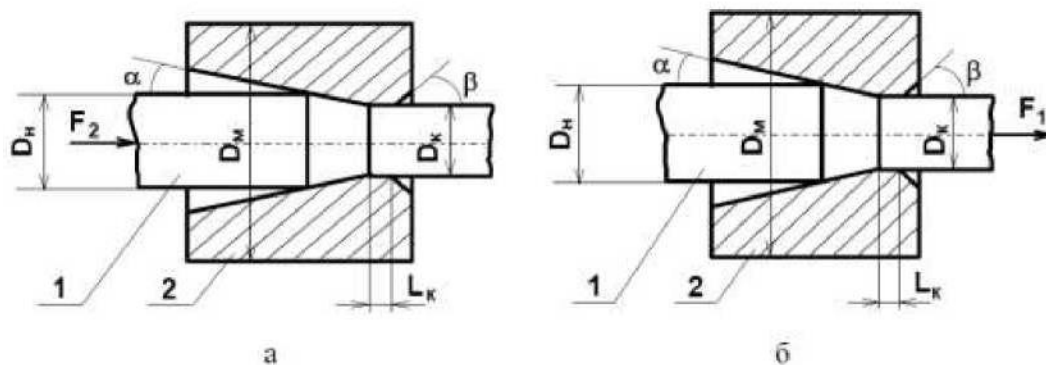


Рисунок 2.3.- Технологічні схеми охоплює деформування за схемою стиснення (а) і розтягування (б) заготовки (1 – заготовка; 2 – матриця)



Рисунок 2.4.- Дефекти виробів з каліброваного металу: а – розкриття кінця прутка при виході з матриці; б – тріщина на кінці заготовки після холодного деформування; в – спотворення форми заготовки при фрезеруванні поздовжнього паза; г – тріщина на поверхні деталі після обробки різанням

На рівні винаходів розроблені технологічне обладнання та оснащення для охоплює зміцнення. Конструктивні та технологічні рішення захищені патентами РФ. Так, для зміцнення переважно довгомірних виробів спроектований і виготовлений універсальний верстат для реалізації ОППД за схемою розтягування і стиснення заготовки. В умовах серійного виробництва відносно короткі деталі типу осей і втулок можна зміцнювати на верстаті, що працює в напівавтоматичному режимі. Для зміцнення окремих кінцевих ділянок деталей типу валів спроектований верстат, що забезпечує співвісність оброблених поверхонь. Для реалізації охоплює деформування на універсальному пресовому обладнанні розроблена технологічне оснащення, що працює в автоматичному режимі.

2.2 Поверхнєве пластичне деформування з використанням відцентрового обкатника

У деяких випадках і ОППД має обмеження щодо застосування. Це стосується залишкового напруженого стану в зміцнених виробках. Експериментальними дослідженнями і розрахунковими даними встановлено, що залишкові напруги при охоплює деформації вельми чутливі до ступеня відносного обтиску. Це призводить до того, що навіть величина поля допуску на заготівлю впливає на величину відносного обтиску, а отже, на величину і характер розподілу залишкових напружень. Таким чином, виконуючи охоплює деформування через жорстку матрицю, можна отримати заготовки з різним рівнем залишкових напруг, що не забезпечує стабільності заготовок по напруженого стану.

Аналогічні проблеми мають місце і при використанні відомих локальних методів поверхневого деформування. Створювані при ППД залишкові напруги характеризуються величиною, знаком і глибиною залягання. Всі ці величини залежать від багатьох чинників, серед яких основними є умови проведення поверхневої пластичної обробки і механічні властивості оброблюваного матеріалу. Багато дослідників відзначають надзвичайну важливість рівномірності обробки, що забезпечує однорідність деформації, врівноваженість залишкових напруг їх рівномірну релаксацію при експлуатаційному навантаженні. На відміну від жорстких валів виконання цієї умови залежить не тільки від конструкції інструменту і режимів зміцнення, а й від механічних властивостей поверхневого шару, закономірностей його мікропластичної деформації при технологічному впливі, релаксаційної стійкості при експлуатації.

Вибір конструкції робочого інструмента визначається основними якісними показниками обробки поверхневого шару. Однорідність зміцнення, відсутність зігнутості вала, мала величина залишкових напруг, їх врівноваженість і рівномірна релаксація під час експлуатації та інші показники пов'язані з величиною зусилля притиску інструмента. Інструмент повинен забезпечувати

сталість цього зусилля при будь-яких змінах форми деталі, наявності просторової похибки і коливань в технологічній системі.

Щоб позбутися від більшої частини проблем, обумовлених динамікою взаємодії наслідком частин технологічної системи, необхідно зупинити обертання деталі, вивести її з безпосередньої взаємодії з патроном, задньою бабкою і люнетами. При такій схемі обробки неможливе утворення початкових напруг від закріплення в патроні і задньої бабки, так як є можливість поздовжньої деформації будь-якої величини. В цьому випадку для забезпечення обробки ППД всій поверхні нежорсткого валу необхідно обертати інструмент. Для виключення деформації вигину заготовлі зусиллям притиску деформуючого елемента необхідний інструмент з повним силовим замиканням.

Для створення робочого зусилля притиску деформуючого тіла (кульки, ролика ін.) В даний час використовується досить широкий спектр різних конструкцій. Відцентровий інструмент більш кращий для забезпечення високої продуктивності при заданій якості і стабільності процесу обробки. До недоліків відомих конструкцій відцентрових Розкатники слід віднести велику частоту обертання інструменту. Для генерації робочого зусилля необхідної величини, що забезпечується силою інерції при малій масі роликів, потрібна велика частота обертання інструменту, яку не забезпечує стандартне обладнання. Висока частота обертання призводить також до виникнення вібрацій, що, безсумнівно, позначається на однорідності обробки. Найбільш простим рішенням проблеми збільшення робочого зусилля, генерованого відцентровою силою, є застосування системи важеля. Така компоновка відцентрового обкатника була розроблена і запатентована ІРНІТУ. На криволінійному важелі закріплюється деформуючий елемент і вантаж (рисунок 2.5).

Вся система обертається відносно нерухомої осі заготовки, і сила інерції вантажу створює момент щодо точки закріплення важеля, який врівноважується моментом робочого зусилля щодо тієї ж точки. При малій довжині плеча криволінійного важеля щодо точки закріплення важеля зростає величина робочого зусилля. Таким чином, деформуючий зусилля регулюється

співвідношенням плечей і величиною вантажу. При великій величині вантажу достатні для обробки ППД зусилля виникають при частоті обертання, що забезпечується стандартним обладнанням. Використання відцентрового обкатника дозволяє регулювати величину жорсткості на вигин оброблюваної деталі установкою двох додаткових опор як в конструкції обкатника, так і поза ним на станині верстата. Якість зміцненого шару при використанні відцентрового обкатника викладено в роботах.

2.3 ППД поперечної обкатки плоскими плитами

Відомі способи ППД не дозволяють обробляти невеликі за габаритами деталі малої жорсткості у вигляді осей, валиків, пальців, так як вони легко згинаються при навантаженні деформуючим інструментом. Є і ряд інших деталей машин, в яких відсутні центрові отвори, що не дозволяє закріплювати їх в центрах металорізальних верстатів. Для обробно – зміцнюючої обробки зазначеного класу деталей запропонована схема обкатки плоскими плитами.

Процес поперечної обкатки плоскими плитами аналогічний процесу поперечно-клинової прокатки, процесу накатки профілю на кріпильні вироби. Основними параметрами поперечно-клинової прокатки є ступінь обтиску і геометрія інструменту. У процесі поперечної обкатки інструмент має вигляд плоскої плити з малим кутом заходная частини α_1 (рисунок 2.6). Малий кут α_2 в вихідній частини інструмента служить для зменшення концентрації напруги при виході деталі із зони обробки. Тому для процесу поперечної обкатки основним параметром режиму обробки є ступінь відносного обтиску Q .

$$Q = \frac{F_u - F_{np}}{F_{np}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де F_u – площа вихідного перетину заготовки;

F_{np} – площа поперечного перерізу заготовки після обкатки;

D – вихідний діаметр заготовки;

d – діаметр заготовки після обкатки.

Кінематика процесу поперечної обкатки плоскими плитами і режими обробки викладені в роботах.

Відмінною особливістю зміцнюючої обробки на плоских плитах є: висока продуктивність процесу, можливість автоматизації технологічного процесу, відсутність необхідності закріплення деталі перед обробкою, відсутність центрових отворів, доступність повної обробки циліндричної поверхні без переустановлення деталі, відсутність вигину при зміцненні, можливість обробки тонких (маложестких) деталей. Для реалізації процесу зміцнення поперечної обкаткою плоскими плитами в умовах багатосерійного виробництва розроблена нова конструкція обкатані верстата.

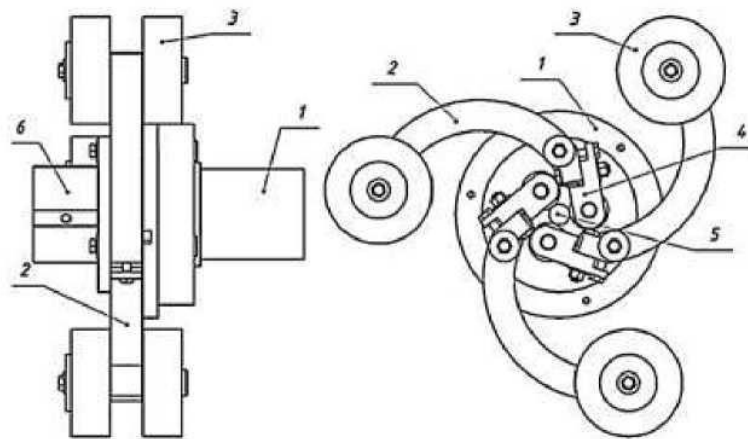


Рисунок 2.5 - Відцентровий обкатник: 1 – корпус; 2 – важіль; 3 – вантаж; 4 – державка з деформуючим роликом; 5 – обкатувати деталь; 6 – додаткова опора (захисний кожух прибораний).

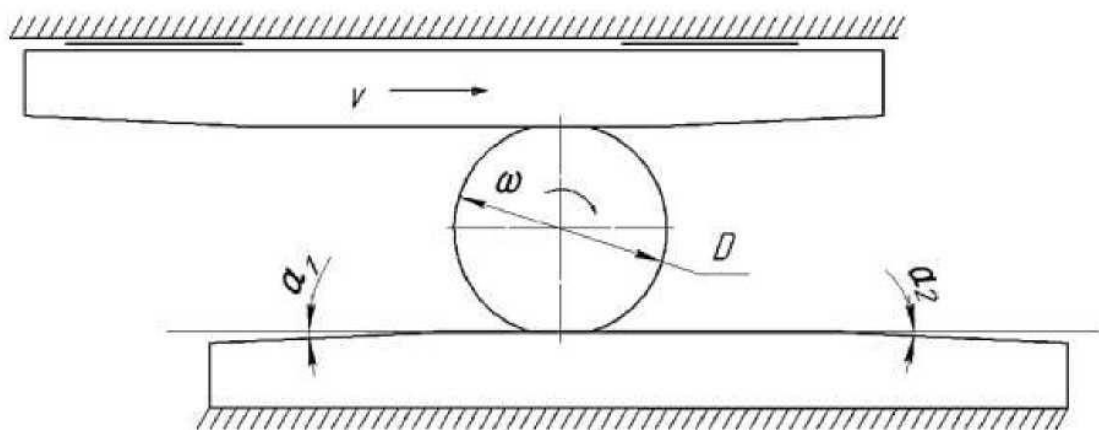


Рисунок 2.6- Схема процесу поперечної обкатки плоскими плитами.

2.4 Обробно-зміцнююча обробка з осцилюючим вигладжуванням

Ефективним напрямком удосконалення методів ППД є застосування додаткових коливальних і коливальних рухів, які дозволяють крім обробно-зміцнюючої обробки формувати регулярний мікрорельєф на зміцнюючій поверхні. При вдосконаленні методів оздоблювальної обробки поверхонь і створення регулярного мікрорельєфу професором Ю.Г. Шнейдером запропонована схема вібраційного обкатування, а професором М.Є. Поповим розроблена технологія і інструментальне оснащення осцилюючими ППД.

Запропоновані методи зміцнюючої обробки відрізняються кінематикою деформуючого інструменту, який здійснює зворотно поступальний рух уздовж або поперек осі деталі. При цьому кожна мікро зона поверхневого шару зазнає утиску в різних напрямках. Зміна знаку напружень відображена ефектом Баушінгера і проявляється в зміні механічних властивостей зміцнюваного матеріалу. На відміну від методів обробки, розроблених Ю.Г. Шнейдером і М.Є. Поповим, в запропонованому методі робочий інструмент здійснює зворотно-поступальний рух в напрямку, перпендикулярному осі деталі, в той час як відомі схеми обробки реалізують коливальний рух інструменту.

Схема осцилюючого вигладжування циліндричних деталей представлена на рисунку 2.7. В якості робочого інструмента використана пластина, що має округлення на одному з торців по радіусу r . Ця частина пластини є робочим елементом, який притискається до обертової оброблюваної заготовки. Пластина може повертатися відносно вертикальної площини на деякий кут α (див. рисунок 2.8), а також здійснювати осцилююче вертикальний рух щодо осі заготовки і переміщатися по напрямку подачі S . В результаті складної взаємодії заданих параметрів на оброблюваній поверхні формується мікрорельєф, що складається з синусоїдальних канавок різної композиції і щільності. Освіта на обробленій поверхні системи канавок, що перетинаються між собою з певною закономірністю, покращує процес змащування пар. Встановлено, що такі системи утворюють штучні «масляні кишень», в яких утримується мастило, що

перешкоджає «схоплюванню» контактуючих поверхонь тертьових пар; формують на поверхнях деталей регулярні нерівності різної форми розташування в залежності від необхідних експлуатаційних характеристик і властивостей; створюють на сполучених циліндричних поверхнях гвинтові мікро шліци; забезпечують декоративну обробку поверхонь деталей замість трудомісткою абразивні препарати.

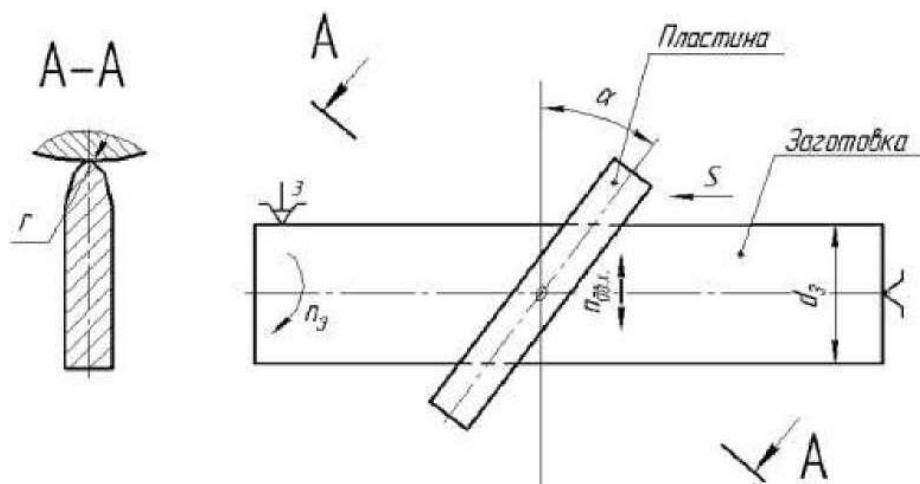


Рисунок 2.7 - Схема процесу осцилюючого вигладжування циліндричних деталей.

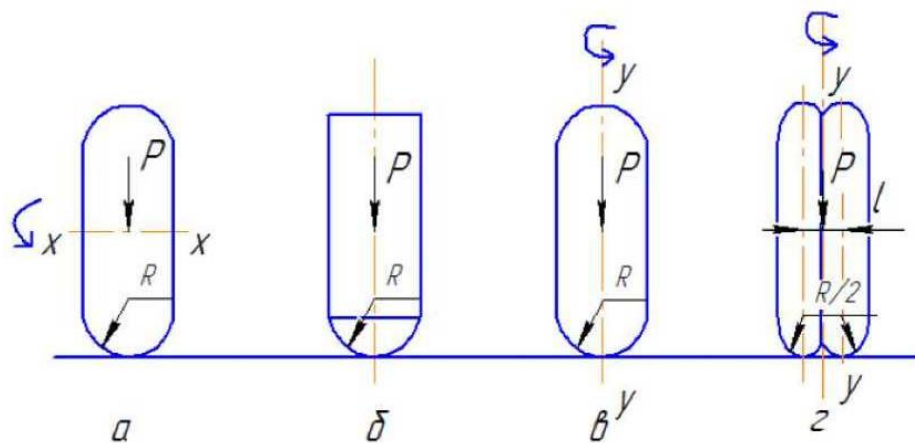


Рисунок 2.8- Схеми навантаження при різних умовах контакту з оброблюваної поверхнею (х-х, у-у: осі обертання)

Вплив параметрів осцилюючого вигладжування (поздовжня подача, натяг, частота обертання заготовки і кут нахилу робочого інструмента) на якість зміцнених деталей викладено в роботах. Інтенсифікація напружень при ППД. При

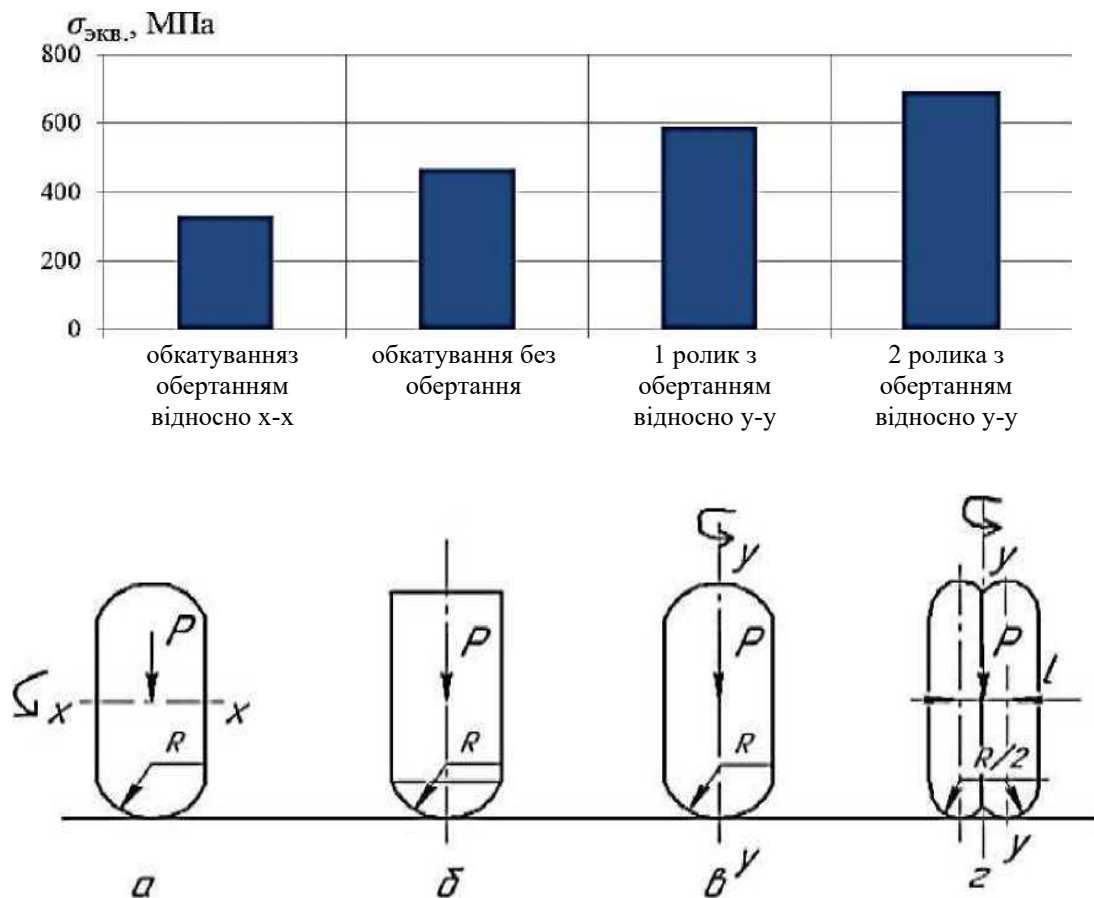
поверхневому пластичному деформуванні деталей малої жорсткості (тонкостінні, довгомірні деталі) можливості локальних методів зміцнення обмежені. Це пов'язано з малою згинальною жорсткістю заготовки, вібраціями в механічній системі, складністю досягнення заданої якості деталей, точності продуктивності обробки, а також з відсутністю необхідного технологічного обладнання.

Пластичне деформування поверхневого шару викликає значні деформації і переміщення частинок металу, що негативно позначається на геометричній формі виробів. З урахуванням вище викладеного виникло питання про необхідність інтенсифікації напружено деформованого стану в осередку деформації технологічних способів поверхневого пластичного деформування для досягнення високих якісних показників при обробці мало жорстких деталей.

З цією метою були розроблені нові технологічні схеми ППД, що забезпечують інтенсифікацію напруженого стану в осередку пружно пластичної деформації. У практиці ППД відомі і широко використовують дві схеми зміцнюючої обробки: зміцнення за схемою кочення робочого інструмента (рисунок 2.9, а) і зміцнення за схемою ковзання (рисунок 2.9, б). Останню схему значно рідше використовують на практиці, тому що тертя ковзання в зоні контакту призводить до великих теплових процесів, а сам інструмент інтенсивно зношується. Однак якщо оцінити ці дві схеми зміцнення з точки зору механіки процесу і можливості деформаційного спотворення мікроструктури, то обробка за схемою ковзання повинна бути більш ефективною.

Технічна ідея по інтенсифікації напруженого стану в осередку деформації полягає в зміні кінематики робочого інструмента, яка підсилює спотворення зерен структури матеріалу. Пропонується обертати деформуючий ролик не відносно горизонтальної осі, а щодо вертикальної (рисунок 2.9, в). В цьому випадку пластичний відбиток від ролика на поверхні деталі являє собою фігуру у вигляді еліпса, що має велику і малу осі. При обертанні ролика навколо вертикальної осі у-у відбувається накладення пластичних полів різних орієнтацій у напрямку, що має сприяти «перемішування» структури в поверхневому шарі. Якщо поєднати два ролика разом і обертати їх також щодо осі у-у (рисунок 2.9, г), то

ефективність обробки буде значно вище, так як в процесі деформування бере участь не два, а чотири вогнища деформації на кожен оборот ролика.



Схеми обробки	о-х, МПа	о-у, МПа	о-z, МПа
Обкатування з обертанням відносноно х-х	-335	-356	-79
Обкатування бет обертання	-352	-365	-86
1 ролик з обертанням відносно у—у	-364	-397	-110
2 ролика з обертанням відносно у—у	-746	-744	-145

Рисунок 2.9- Вплив схем деформування на максимальні значення еквівалентних залишкових напруг (а) і компонент максимальних залишкових напружень зразка (б)

На рисунку показано вплив схем деформування на максимальне еквівалентну залишкову напругу і компоненти максимального залишкової напруги зразка. При ППД коченням (просте обкатування) відбувається мінімальне

спотворення структури. За умови ППД ковзанням виникає велике тертя, яке призводить до підвищення інтенсивності напруги в зоні деформації. При ППД з обертанням ролика щодо своєї діаметральної осі (у-у) за рахунок різних розмірів вогнищ деформації напруги посилюються. Ефективний результат отриманий при ППД з обертанням двох роликів щодо осі (у-у). В результаті описаної конструкції профілю робочої частини двох радіусного обкатані ролика метал поверхневого шару деталі при обробці знаходиться в умовах складного напруженого стану, відчуває пластичну деформацію з накопиченням великої кількості спотворень. Умова контакту і характер взаємодії деформуючого інструменту з деталлю в процесі обробки дуже впливає на перерозподіл матеріалу поверхневого шару. Виявлено, що основними чинниками, що впливають на напружено-деформований стан деталей, є геометрія, форма, взаємне розташування елементів деформуючого інструменту і їх кінематика щодо оброблюваної деталі. Як висновок, для обробно-зміцнюючої обробки деталей малої жорсткості розроблені нові технологічні процеси поверхневого пластичного деформування. В основі зміцнюючих процесів використані традиційні схеми обробки металів тиском - калібрування і поперечна прокатка. Нові процеси локального зміцнення деталей машин побудовані на зміні кінематики обробки - відцентрове зміцнення і зміцнення роликом зі зміненою кінематикою обертання. Розрахункові дані і експериментальні дослідження показали високу ефективність нових способів обробно зміцнюючої обробки.

2.5 Висновки розділу

Розглянувши наведені у роботі методи поверхневого пластичного деформування ми маємо змогу обрати варіант який є найбільш оптимальним для деталей «Важіль» та задовольняє експлуатаційні вимоги. Найбільш оптимальним методом приймаємо обкочування заготовки роликом, що забезпечує значне збільшення міцності і мікротвердості оброблених поверхонь, вони більш зносостійкі, ніж, наприклад, поверхні отримані за допомогою лез або абразивної обробки.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Глибина пластично деформованого шару.

Під час розрахунку напружень заготовки початок координат знаходиться в центрі контакту між роликом і заготовкою, осі x і y співпадають з великою і малою осями симетрії відповідно еліптичної площадки, а з напрямом контактної навантаження силою P вісь співпадає вісь z . Результати розрахунків внутрішніх напружень розраховані для ролика що має наступні геометричні параметри: $R_{11} = 27\text{мм}$, $R_{21} = 7\text{мм}$, $R_{12} = 25\text{мм}$ при глибині вдавлювання $h = 0,014\text{мм}$ наведені на рисунку 3.1, при глибині вдавлювання $h = 0,028\text{мм}$ наведені на рисунку 3.2, а при глибині вдавлювання $h = 0,042\text{ мм}$ ми бачимо на рисунку 3.3.

Аналогічні розрахунки виконаємо також для випадку коли має місце пластична деформації в зоні контакту. В роботі наведено формули за якими можна виконати розрахунок головних напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ по осі z . Дані формули отримано за умови, що $p = p_{сеп} = const$, але радіус вмятини: $r \neq const$.

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сеп} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \times \right. \\ \left. \times \sin^2(\varphi) - (1-2\mu) \left(L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} P_{сеп} \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сеп} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \times \right. \\ \left. \times \sin^2(\varphi) - (1-2\mu) \left(L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} P_{сеп} \quad (3.2)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сеп} \cdot \int_0^{\pi/2} L^3 d\varphi - P_{сеп} \quad (3.3)$$

де $L = \frac{z}{b} \left(\frac{1}{1-e^2 \sin^2 \varphi} - \frac{z^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}$, $e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}$ – ексцентриситет контуру еліптичної

площадки, по поверхні якої розподілений тиск p .

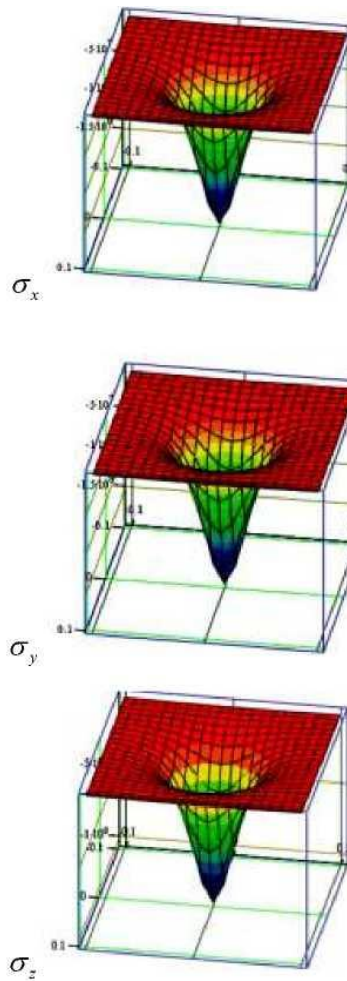


Рисунок 3.1 – Розподіл $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ за умови контакту ролика при глибині вдавлювання $h = 0,014\text{мм}$

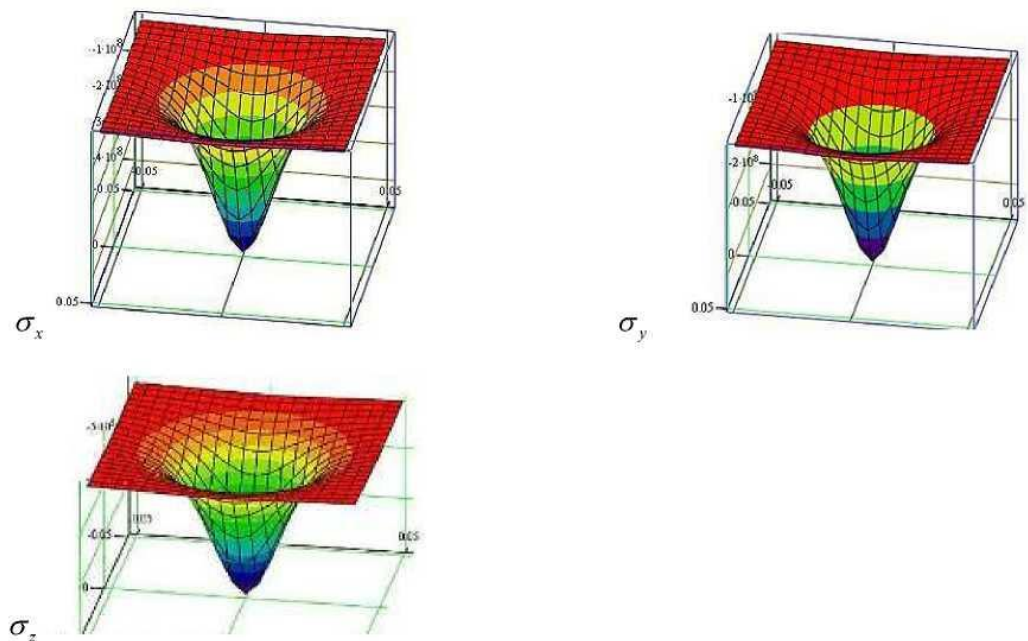


Рисунок 3.2 – Розподіл $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ за умови контакту ролика при глибині вдавлювання $h = 0,028\text{мм}$

Проаналізувавши отримані результати можна визначити, що на осі z , яка проходить через центр вм'ятини мають місце найбільші значення напружень. За цих умов напруження зростають поступово залежно від зростання глибини вдавлювання інструменту. Таким чином, отримуємо нормальні напруження в центрі вм'ятини, що в свою чергу дорівнюють $\sigma_z = -193\text{МПа}$ при $h = 0,014\text{мм}$ і $\sigma_z = -2140\text{МПа}$ при $h = 0,042\text{мм}$; $\sigma_y = -104\text{МПа}$ при $h = 0,014\text{мм}$ і $\sigma_y = -1153\text{МПа}$ при $h = 0,042\text{мм}$; $\sigma_x = 98\text{МПа}$ при $h = 0,014\text{мм}$ і $\sigma_x = -314\text{МПа}$ при $h = 0,042\text{мм}$.

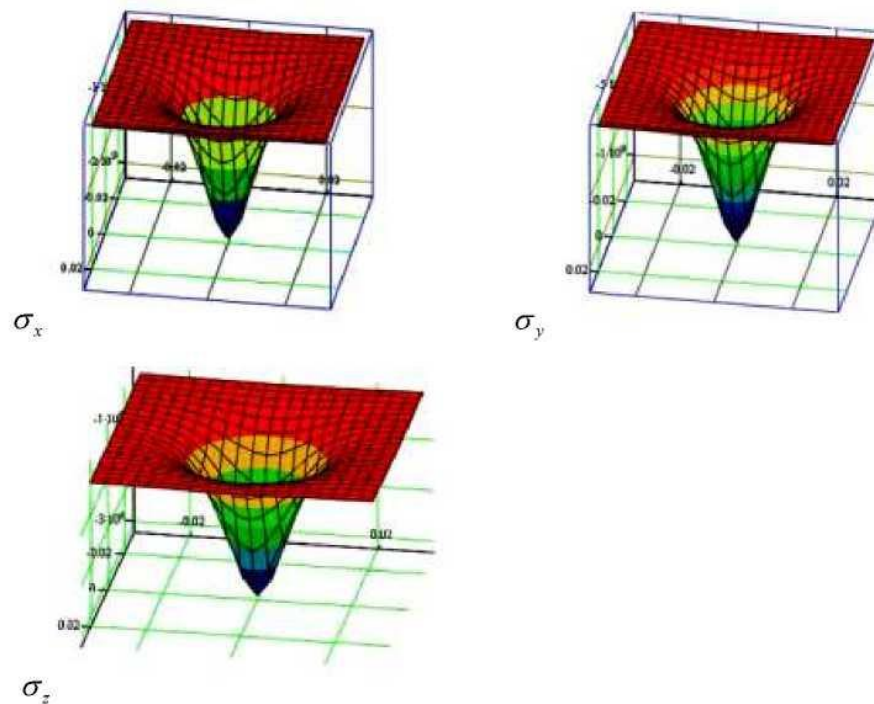


Рисунок 3.3 – Розподіл σ_x σ_y σ_z за умови контакту ролика при глибині вдавлювання $h = 0,042\text{мм}$

Виходячи з умов, що на границі пружної і пластичної областей ($S \approx h$) можна вирахувати глибину поширення пластичної деформації S h :

$$\sigma_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \quad (3.4)$$

Наведену вище систему рівнянь за умови $b > 1$ можна спростити до a одного рівняння:

$$\frac{\sigma_T}{P_{сер}} = \frac{\pi}{\frac{1}{4} \left[5 \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} + 3 \right] \left(\frac{h_b}{b} \right)^{2+0,2 \ln(b/a)} + \frac{17}{6 + \ln \frac{b}{a}}} \quad (3.5)$$

З минулої формули ми отримуємо наступну залежність для визначення h

$$h_s = b \left[\frac{4}{5 \left(\frac{b}{a} \right)^{3/2} + 3} \left(\frac{P}{a \cdot b \cdot \sigma_T} - \frac{17}{6 + \ln \frac{b}{a}} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln \frac{b}{a}}} \quad (3.6)$$

Формула дійсна для випадків коли $0,1 \leq \frac{\sigma_T}{P_{nad}} \leq 0,5$, а відносна похибка розрахунків h по даній формулі повинна не перевищувати 3-5%. На границі вказаного інтервалу ми отримаємо максимальне значення напруження.

За умови що $\frac{b}{a} = 1$, або контур вм'ятини обмежений колом що має діаметр d , формулу можна спростити до наступного вигляду:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 1,42 \left(\frac{d}{2} \right)^2} \quad (3.7)$$

Дану формулу, можна використовувати для розрахунків h за умови $\frac{b}{a} \geq 0,6$, при цьому маючи малу похибку, але $d = d_{id} = 2\sqrt{a \cdot b}$

З вище наведених формул ми отримали розподіл напружень в залежності від глибини відбитку та z (рисунк 3.4).

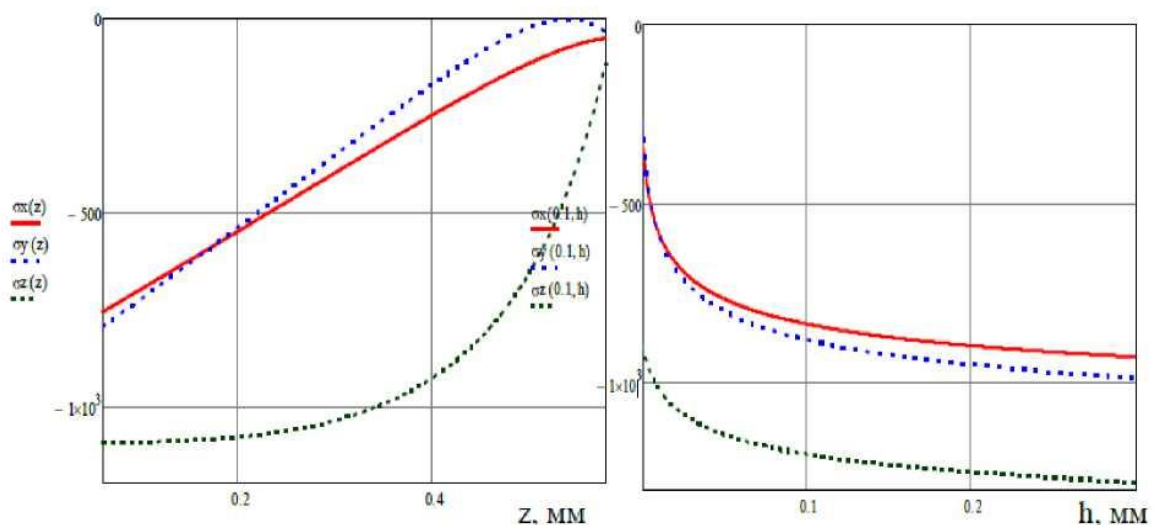


Рисунок 3.4 – Залежність глибини вдавлювання ролика h та напружень на відстані від поверхні z

Проаналізувавши отримані дані ми можемо зробити наступні висновки:

- занижені значення інтенсивності напружень отримуються при математичному моделюванні, що пов'язано з прийнятих припущень при точних розрахунка;
- вершина хвилі, є найбільш небезпечним, по причині можливості руйнування поверхневого шару при вершині. Це небезпечно тим, що зазвичай візуально може бути не помічений дефект, оскільки ролик при обкочуванні частково закатує(тим самим «маскуючи») дефекти, що проявляються при експлуатації обробленої деталі.
- із збільшенням відношень осей еліпса a до b зростає також нерівномірність розподілу напружено-деформованого стану безпосередньо у поверхневому шарі деталі.

3.2 Математичне моделювання процесу обкочування заготовки роликом

ППД можна застосовувати для обробки різноманітних поверхонь: плоских поверхонь колінчастих і шліцьових валів, різьб, циліндричних, зубчастих коліс, тощо.

Для виконання розрахунку усіх параметрів напружено-деформованого стану поверхневого шару заготовки що оброблюється в процесі обкочування роликом за допомогою методу скінчених елементів ми вивчили розробки, що були у вільному використанні, але вони не надавали заданої точності.

Значні деформації відбуваються у зоні пластичної хвилі за умови несприятливої схеми напруженого стану. При цьому показник напруженого стану n змінюється у зоні хвилі від $\eta = 0,71$ до $\eta = 1,6$, а параметр Надаї - Лоде може змінюватись від $\eta_a = -0,3$ до $\eta_a = -0,4$.

Основні деформації можна спостерігати в зоні контакту інструменту та деталі, проте зміна використаного ресурсу пластичності на предмет збільшення незначна. В області безпосереднього контакту маємо показники $\eta = -0,75-0,7$,

$\eta_a = 0,2 \dots 0,3$, з чого можна зробити висновок, що має місце схема всебічного стиснення заготовки. При переході частки матеріалу в другу зону з першої під дією інтенсивних деформацій за умови впливу гідростатичним стиском можливо усунути деяких з утворених дефектів.

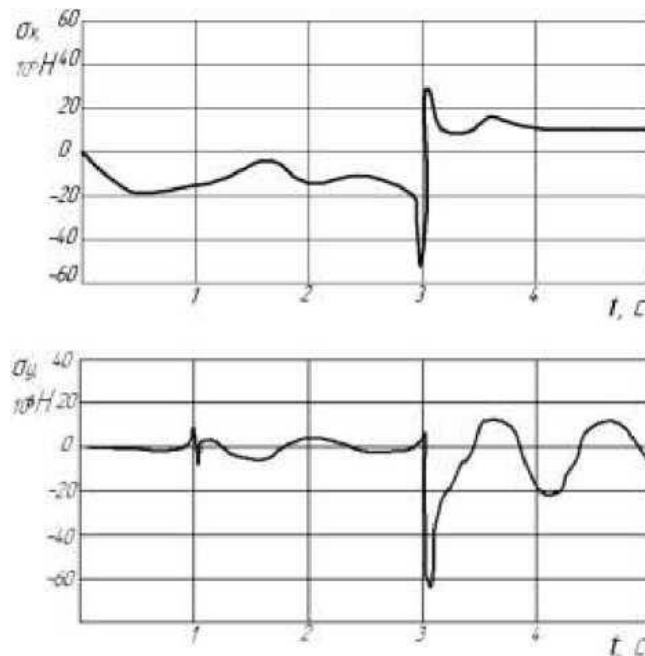


Рисунок 3.5 - Нормальні поверхневі напруження

У роботі ми визначили, що незворотна пошкодженість металу поверхневого шару заготовки під час оброблення обкачуванням може відбуватись частіше, в зоні пластичної хвилі, але найбільше в її вершині.

3.3 Висновки до розділу

1. Виконано чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні роликом, в результаті якого встановлено напружено-деформований стан матеріалу в залежності від параметрів обкочування.

2. Визначено напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика з довільною кривизною робочої поверхні вповерхню довільної кривизни.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Стан умов праці в галузі

Дія негативних виробничих факторів виробничого середовища може призвести до виробничої травми, професійного чи виробничо обумовленого захворювання.

Травма – порушення анатомічної цілісності організму людини чи його функцій у результаті дії факторів зовнішнього середовища.

Для виробничої травми зовнішнім середовищем є виробниче середовище.

Виробничий травматизм класифікується за наступними ознаками:

- ступенем зв'язку з виробництвом (випадки, що пов'язані з виробництвом, і випадки невиробничого характеру),
- числом потерпілих (окремі та групові випадки),
- ступенем ваги травм (випадки зі смертельним результатом і без нього),
- характером впливу на людину і характеру ушкоджень (механічні, термічні, електричні, хімічні травми, отруєння).

Травма часто є наслідком нещасного випадку (НВ). Нещасний випадок на виробництві – випадок раптової дії на працюючого небезпечного виробничого фактора (виробничого середовища) при виконанні трудових обов'язків чи завдання керівника робіт, у результаті якого нанесений збиток здоров'ю чи наступила смерть.

Професійне захворювання (ПЗ) – захворювання, яке викликане надмірною напругою організму чи дією на працюючого шкідливих умов праці. Діагноз профзахворювання встановлюється у кожному випадку з урахуванням характеристик умов праці, тривалості роботи людини за даною професією, професійного «маршруту» працюючого, даних попередніх медоглядів, результатів клініко-лабораторних і діагностичних досліджень. Цей діагноз установлюється лише тоді, коли самі умови праці обумовили розвиток даного захворювання,

тобто є його безумовною причиною.

Виробничо обумовлені захворювання – захворювання, перебіг яких ускладнюється умовами праці, і частота їх перевищує частоту подібних захворювань у працівників, що не підпадають під вплив визначених професійних шкідливих факторів.

Виробничий травматизм і професійні захворювання спричиняють величезні, непоправні суспільні втрати, негативно впливають на економіку країн, рівень життя народів. Кількість нещасних випадків на виробництві у світі складає близько 125 млн чоловік щорічно, з них приблизно 220 тис. гине. За статистичними даними щосекунди у світі на виробництві травмується 4 людини; кожні три хвилини внаслідок НВ чи ПЗ у світі вмирає одна людина; в Україні кожні 8 хвилин травмується одна людина і кожні 5 годин вмирає одна людина. За кількістю НВ на 1000 працюючих Україна посідає провідне місце серед економічно розвитих країн – 0,104 (Великобританія – 0,016, Японія – 0,02, Швеція – 0,032, Фінляндії – 0,038, ФРН - 0,08).

За даними журналу «Охорона праці» (2004, № 3) можна виявити статистику травматизму по Україні (табл. 1).

На жаль, зниження травматизму зв'язане зі зменшенням чисельності працівників, зайнятих у виробництві. Про це говорять наступні цифри: в умовах, що не відповідають санітарно-гігієнічним нормам, працює зараз більш 3,4 млн чоловік, забезпечення засобами індивідуального захисту складає 40 – 50 %, 850 тис. машин, механізмів, транспортних засобів не відповідають вимогам безпеки, більш 10 тис. виробничих будинків і споруджень знаходяться в аварійному стані.

Таблиця 4.1 – Дані про виробничий травматизм в Україні

Рік	ВВП, млн грн.	Кількість травмованих людей	
		Усього	Серед них зі смертельним кінцем
1	2	3	4
1012	140137	111627	2334
2013	102539	94224	2270
2014	90577	80450	2195

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
2015	81519	64775	1900
2016	90000	54510	1646
2017	102593	50827	1551
2018	135000	39844	1388
2019	170070	34288	1325
2020	210411	30992	1399
2021	220932	26168	1285
2022	243025	24847	1230

Аналіз розподілу смертельних випадків за напрямками нагляду показує, що останні роки на 1-х місцях знаходяться агропромисловий комплекс, вугільна промисловість, невиробнича сфера, будівництво і транспорт. У машинобудуванні щорічно гине в середньому 44–50 чоловік. Крім того, щорічно на підприємствах машинобудування реєструється від 15 до 50 випадків професійних захворювань (розподіл за галузями: 80% вугільна промисловість, 12,7% чорна металургія, 8% машинобудування). У структурі профзахворювань на першому місці знаходиться вібраційна патологія (більш 40 % усіх випадків), далі впливають захворювання органів подиху – 25 – 35%.

Основна причина стану безпеки, що погіршується, і охорони праці в Україні – несприятлива економічна ситуація, що ускладнює рішення цілого ряду конкретних проблем (українська повільна заміна морально і фізично застарілого устаткування, повсюдне скорочення чи повне припинення фінансування і матеріально-технічного забезпечення заходів щодо безпеки виробництва й охорони праці на всіх рівнях керування).

На думку іноземних фахівців велика кількість нещасних випадків зі смертельним кінцем обумовлено п'ятьма основними причинами:

- незадовільна підготовка працівників і керівників з питань охорони праці;
- відсутність належного контролю за станом безпеки і виконанням

установлених норм;

- недостатня забезпеченість працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ);
- повільне впровадження методів і пристроїв колективної безпеки на підприємствах;
- зношеність (у деяких галузях до 80 %) засобів виробництва.

Щорічні виплати у зв'язку з відшкодуванням збитку, заподіяного життю і здоров'ю працюючих, досягають майже 400 млн гривень, а витрати на заходи щодо охорони праці – близько 20 млн грн. Для порівняння – витрати підприємств США на охорону праці коливаються від 5 до 7 млрд доларів у рік. Аналогічні чи близькі підходи до рішення проблеми охорони праці в Німеччині, Франції, Австрії, Великобританії, Швеції й інших країнах.

Економічні методи керування охороною праці показують керівникам підприємств, що краще і дешевше вкладати кошти в охорону праці, у заходи щодо попередження виробничих ризиків, чим прирікати себе на постійну ліквідацію наслідків нещасних випадків на виробництві.

4.2 Механічна обробка металів різанням

При холодній обробці металів на людину діє цілий комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НіШВФ).

До небезпечних фізичних факторів відносяться:

- рухомі частини верстатів, вироби і заготовки;
- стружка і осколки інструментів;
- нагріті поверхні устаткування, інструменту, заготовок;
- висока напруга в силовій електричній мережі й статична електрика;
- підйомно-транспортні пристрої і переміщувані вантажі;
- можливість виникнення пожеж.

Шкідливими фізичними факторами є:

- високі вологість і швидкість руху повітря робочої зони, підвищена або

знижена температура;

- підвищені рівні випромінювань, шуму і вібрації;
- підвищений вміст пилу в повітрі робочої зони;
- недостатня освітленість, підвищена яскравість світла і пульсація світлового потоку.

До хімічних НіШВФ відносяться токсичний пил, шкідливі пари і газы, аерозолі, агресивні рідини (кислоти, луги).

До біологічних НіШВФ відносяться мікроорганізми, що знаходяться у відпрацьованій мастильно-охолоджувальній рідині (МОР).

До психофізіологічних НіШВФ процесів обробки матеріалів різанням відносяться:

- фізичні перевантаження при установці, закріпленні та знятті великогабаритних виробів;
- перенапруження зору;
- монотонність праці.

До найважливіших факторів можна віднести: ріжучі інструменти (фрези, дискові пили, абразивні круги), приводні і передавальні механізми, зливну (стрічкову) стружку, стружку, що відлітає, пил.

При обробці крихких матеріалів (чавуну, латуні, бронзи, графіту, карболіту, текстоліту і ін.) на високих швидкостях різання стружка від верстата розлітається на значну відстань (3 – 5 м).

Металева стружка, особливо при точінні в'язких металів (сталей), що має високу температуру (400 — 600°C) і велику кінетичну енергію, являє серйозну небезпеку не тільки для працюючого на верстаті, але і для осіб, що знаходяться поблизу верстата. Найпоширенішими у верстатників є травми очей. Так, при токарній обробці від загального числа виробничих травм пошкодження очей перевищило 50%, при фрезеруванні - 10 % і близько 8 % при заточуванні інструменту і шліфуванні. Очі ушкоджувалися стружкою, що відлітає, пиловими частинками оброблюваного матеріалу, осколками ріжучого інструменту і частинками абразиву.

Випадки механічного травмування при роботі на фрезерних верстатах розподіляються таким чином в відсотках:

- травмування пальців або кистей рук унаслідок захоплення їх інструментом, що обертається, – 70;
- травмування очей стружкою, що відлітає, – 15;
- травмування рук або ніг при наладці верстата, установці та знятті оброблюваної деталі, кріпленні та знятті інструменту, – 8;
- травмування тіла працюючого деталлю, що вирвалася з кріплення при обробці, – 3;
- травмування пальців рук при прибиранні стружки, – 3;
- інші випадки травмування, – 1.

Одним з шкідливих виробничих чинників є пил. Основним джерелом утворення пилу в механічних цехах служать шліфувально-заточні операції. У процесі шліфування в повітря виділяється вискодисперсний пил (0,5 – 3 мкм), до складу якого, окрім частинок металу, входять частинки абразивного (електрокорунд і карбід кремнію) і зв'язуючого матеріалу (керамічна, силікатна, магнезійна і інші зв'язки). Концентрація пилу досягає найбільшої величини при внутрішньому шліфуванні без вентиляції (28 – 153 мг/м³), при сухому шліфуванні з відсмоктуванням – запиленість складає 20 мг/м³ і більш.

Вологе шліфування без вентиляції також не забезпечує повного знепилення (середня концентрація пилу – 6 – 7 мг/м³). Крім того, утворюється масляна аерозоль з концентрацією 15 – 20 мг/м³.

При точінні латуні й бронзи кількість пилу в повітрі виробничого приміщення відносно невелика (14,5 – 20 мг/м³). Проте, пил, що утворюється при точінні цих сплавів, токсичний (містить домішки свинцю).

При обробці різанням полімерних матеріалів відбуваються механічні й фізико-хімічні зміни їх структури і в повітря робочої зони поступає складна суміш парів, газів і аерозолів. Летючі продукти, що утворюються при тепловому розкладанні ряду пластмас, можуть викликати зміни центральної нервової і судинної систем, кровотворних і внутрішніх органів, а також шкірно-трофічні

порушення. Аерозолі нафтових масел, що входять до складу МОР, можуть викликати роздратування слизових оболонок верхніх дихальних шляхів, сприяти зниженню імунобіологічної реактивності.

Тривале вдихання пилу у виробничих умовах може призвести до розвитку пилових захворювань бронхолегеневого апарату – пневмоконіозів і хронічного пилового бронхіту. Надзвичайно небезпечне вдихання пилу, газів, туману берилію і його сполук, що призводить до захворювання беріліоз.

У робочих верстатників може виникати ряд захворювань шкіри (дерматози) від дії змащувальних і охолоджуючих масел і емульсій, сполук хрому, нікелю, кобальту, пластичних мас, скловолокнистих пластиків та ін. Найбільш поширені алергічні дерматити і екзема. МОР можуть шкодити організму при частому попаданні масла на відкриті ділянки шкіри, при тривалій роботі в одязі, що пропитане маслом, при вдиханні масляного туману.

Систематичний контакт з маслом може викликати гострі та хронічні захворювання шкіри, зокрема захворювання відоме під назвою масляних угрів (фолікулітів).

У робітників-верстатників у результаті тривалого стояння розвивається виражене розширення вен на ногах, яке ускладнене запальними або трофічними розладами. Робітники на конвеєрі, шліфувальники схильні до захворювань периферичних нервів і м'язів.

До виникнення цих захворювань призводять систематичні тривалі статичні напруги м'язів, однотипні рухи, що виконуються у швидкому темпі, тиск на нервові стовбури і їх мікротравматизація.

4.3 Токарські верстати

До верстатів токарської групи відносяться автомати і напівавтомати токарські одношпиндельні та багатошпиндельні; верстати токарно-револьверні; різьботокарні; токарно-затиловочні; токарно-карусельні; токарно-гвинторізні; токарські спеціальні і спеціалізовані. Обробка різних матеріалів на верстатах

токарської групи є найбільш розповсюдженим способом одержання точних розмірів і форм деталей машин і приладів типу тіл обертання.

Верстати токарської групи складають близько 30% усього парку металообробних верстатів. Вивчення виробничого травматизму показує, що серед великого числа верстатів токарської групи найбільшої уваги з погляду безпеки праці вимагають токарно-гвинторізні, токарно-револьверні й інші головним чином універсальні верстати.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на токарних верстатах є стружка і пил, ріжучі інструменти, рухомі елементи верстата, шум, створюваний прутками, що обертаються.

Особливу небезпеку травмування представляє стружка. Зливна стружка, яка утворюється при точінні в'язких матеріалів, може призвести до порізу рук і ніг токарів і прибиральників стружки. Роздроблена стружка, особливо при обробці крихких матеріалів (латуні, бронзи, чавуну), а також при дробленні зливної стружки, розлітається на відстань 3 – 5 м при температурі 400 – 600°C і являє небезпеку для очей, може викликати опіки шкіри рук і обличчя токарів і людей, що знаходяться поблизу [39].

Для запобігання травмування зливною стружкою, застосовують різні пристрої для її завивання і дроблення. Зливну стружку можна також відводити в приймач стружки без зміни форми. При цьому необхідно періодично за допомогою крюків підправляти стружку. Приймачі стружки звільняються уручну або шнековими транспортерами.

В якості засобів захисту від стружки, що відлітає, застосовують огороження зони різання захисними екранами, системи видалення стружки і пилу від ріжучих інструментів, використовують захисні окуляри і щитки.

Токарські верстати, на яких відбувається обробка різанням з утворенням великої кількості пилу і дрібної стружки, повинні мати різні пиловідсмоктуючі пристрої у виді парасолів, які розташовані над зоною різання і приєднуються до індивідуальних чи групових вентиляційних установок, що працюють на пиловловлювання. Для знепилення і масового виробництва виробів з крихких

матеріалів рекомендують використовувати перспективніші індивідуальні пристрої з пилостружкоприймачами. Вони забезпечують комплексне рішення проблеми знепилення і видалення дрібної стружки безпосередньо із зони різання. Такі пристрої створюються на основі закономірностей формоутворення і напрямку руху потоку стружки і пилових частинок, що утворюються в процесі обробки крихких матеріалів при різних режимах різання. При цьому використовуються групові або індивідуальні відсмоктуючі системи. Основним захисним пристосуванням від стружки є окуляри.

Захисні окуляри служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри постачені фігурними боковинами, що відкидаються. Вони рекомендуються для верстатників різних професій.

При роботі на токарських верстатах використовують захисні екрани, що являють собою металеві рамки з вставленими листами зі сталініту. У випадку чорнового гостріння використовують щитки зі сталі з ручним керуванням. Ними закривається зона різання тільки перед початком різання, а всі інші прийоми виконуються при відкритій зоні різання.

При обробці магнієвих сплавів стружка, спилки і пил можуть спалахувати. Тому у випадку застосування пневматичних систем видалення пилу і стружки від різальних інструментів варто виключити можливість утворення іскор і статичних зарядів. Електроустаткування таких пневматичних систем повинне мати вибухозахист.

Важливою умовою безпеки при роботі твердосплавним інструментом є дотримання встановлених режимів різання, тому що твердосплавні пластини можуть руйнуватися і наносити травми. Але не менш важливим є вимикання верстата в наступному порядку: спочатку відключають подачу, а потім – шпинделя.

У випадку необережного повороту голівки різця можливі порізи гострими крайками різців. Тому ці рухи вимагають особливої уваги робітника. При нарізуванні різьблення різцем в упор є небезпека вривання інструмента в

шпиндель. Для забезпечення безпеки роботи в цьому випадку застосовують пристосування для автоматичного відводу різця.

Травмування може бути також викликано деталями кулачкових і повідкових патронів, хомутиками та ін. Найбільше часто для закріплення на токарських верстатах застосовують кулачкові патрони. Кулачки не повинні виходити за межі циліндричної поверхні корпусу, але при обробці заготівель великих діаметрів ця вимога безпеки часто порушується. Надзвичайно небезпечно знімати задирки напилком поблизу патрона. У таких випадках варто застосовувати захисне огороження патрона, заблоковане з обертанням шпинделя. Поки огороження відкрите, верстат не включається. При закріпленні заготівель у кулачковому патроні причиною травм може стати забутий у патроні ключ. Для усунення цієї причини травмування застосовують ключ, принцип дії якого полягає в тім, що при натисканні на нього вставка ключа входить у гніздо патрона, при знятті зусилля пружина виштовхує ключ.

Найбільш безпечним є самозатискний кулачковий патрон. Принцип його роботи полягає в тому, що при збільшенні зусиль різання збільшується і зусилля затиску деталі.

Умовою безпечної роботи повідкових пристосувань є їх гладка циліндрична поверхня. Сучасні прецизійні верстати поставляються з повідковими патронами. Для безпечного закріплення деталей використовують цанговий затиск, яким часто заміняють кулачковий патрон, тому що він забезпечує велику точність центрування заготівель. Конструкція цангового затиску дозволяє без зупинки верстата рухом рукоятки затискати і звільняти деталь, тому що швидкість обертання цанги при цьому дуже незначна. Усі обертові частини, конструкції захищені кожухом і пофарбовані в жовтий сигнальний колір.

Для кріплення заготівлі в цанговому патроні у випадку, якщо деталь довга і тонка (діаметром до 3 мм), служить втулка-люнет, через яку проходить пруток. Різець закріплений перед втулкою-люнетом. Умови різання виключають прогин, деформацію и вирив деталі.

Обов'язковою умовою безпечної роботи на токарних верстатах у центрах є

гарний стан центрів та центрових отворів, а також відповідність центрів, які використовуються вимогам роботи.

Центрові отвори мають бути змащеними. При роботі на високих швидкостях необхідно користатися тільки обертовими центрами. При цьому задня бабка повинна бути надійно закріплена. У випадку обробки в центрах тонких важких деталей для того щоб їх надійно закріпити, а також щоб одержати високу точність при обробці використовують нерухомі люнети. Задній центр не має бути туго затягнутим, варто стежити за тим, щоб не з'являлися сильні вібрації.

Пускові та перемикаючі пристрої токарських верстатів повинні відповідати загальним вимогам, пропонованим до таких пристроїв. З цих вимог особливе значення має усунення можливості їхнього мимовільного (випадкового) вимикання. Стосовно до токарських верстатів це відноситься, насамперед, до блокованих рукояток включення шпинделя. Ці рукоятки повинні завжди мати надійну фіксацію в заданих положеннях. Якщо фіксатор ослабнув, необхідно негайно припинити роботу і сповістити про це майстра.

При роботі на токарських пруткових верстатах-автоматах довгі прутки захищають трубами. З метою усунення шуму труби виконують безшумними. Набули застосування мало шумні труби з поліетиленовими вкладишами. На стійках кріпиться нерухомий металевий кожух, з яким шарнірно з'єднаний знімний кожух. У кожухи укладається гумова прокладка, у якій монтуються поліетиленові вкладиші шириною 20 мм із відповідним діаметром для прутка, подаваного в токарський автомат. При зносі вкладиші легко замінюються. Застосування труб такої конструкції дозволяє знизити рівень шуму в 2 – 3 рази в порівнянні із серійними трубами.

Обертові ходові гвинти і валики токарських верстатів можуть захопити одяг робітника, що призведе до травми. Їх необхідно обгороджувати кожухами. Також треба строго дотримувати правила носіння спецодягу.

В усіх сучасних токарських верстатах передавальні механізми знаходяться усередині корпусів верстата і не бувають небезпечними. Запобіжні заходи полягають у тім, щоб механізми, що рухаються, були в справності, змазані і

відрегульовані, а після ремонту встановлені на свої місця.

При роботі на токарно-карусельних верстатах планшайби обов'язково повинні мати огороження. У планшайбах також необхідно передбачити обмежники, що не допускають можливості вильоту затискних пристроїв. Пристрої, що затискають деталь, повинні мати тверді упори. Сучасні верстати с ЧПК, автомати, прецизійні універсальні станки мають захисні засоби з пристроями, що блокують. До них висувають наступні вимоги: не обмежувати технологічні можливості верстата і не викликати незручності під час роботи, збирання і налагодження. Крім того, кріплення захисних пристроїв мають бути надійним. На токарських верстатах цим вимогам повинні відповідати пускові і перемикаючі пристрої, а також рукоятки включення і вимикання, які блокують. Якщо рукоятки керування верстата не мають надійної фіксації, то роботу необхідно негайно припинити.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розроблювання стартап – проекту

Таблиця 5.1 - Загальні відомості

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка методу поверхневого пластичного деформування з підвищеною екологічністю	Фінішне оброблення деталей Токарний верстат Токарно-гвинторізний верстат	Менша вартість за стандартні методи з абразивними інструментами Екологічніше більшості статичних методів ППД Дешевше для багатосерійного виробництва

Таблиця 5.2 - Визначення позитивних, негативних чи нейтральних сторін

№	Техніко- економічні характеристики	Конкуренти				Слабка сторона	Нейтральна сторона	Сильна сторона
		Мій проект	Конку- рент №1	Конку- рент №2	Конку- рент №3			
1	Вартість	+	-	-	+	-	-	+
2	Налагодження	-	-	-	+	-	+	-
3	Точність	+	-	-	-	-	-	+
4	Швидкість	+	+	+	-	-	-	+
5	Економія	+	-	-	-	-	-	+
6	Попит	-	+	+	-	+	-	-

5.2 Технологічність проекту

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення інструменту	Токарний верстат	+	+
2	Фінішне оброблення	Токарний верстат ЧПУ	+	+
4	Патентування	Сертифікаційний центр	+	-
5	Спроба реалізації	Маркетинговий відділ	+	-
6	Масове виробництво	Токарний верстат	+	-

5.3 Аналіз попиту продукту

Таблиця 5.4 - Характеристика ринку

№	Показники ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	3 од.
2	Загальний обсяг продаж	250000 грн
3	Динаміка ринку	зростає
4	Наявність обмежень для входу	Конкуренція, мала обізнаність споживачів, новий метод.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Паспортні дані, сертифікація, контрольні виміри, якість.
6	Середня норма рентабельності в галузі	100%

Таблиця 5.5 - Потенційні споживачі товару

№	Попит, що потребує ринок	Клієнтська база	Відмінності у поведінці споживачів	Вимоги до товару
1	Фінішне оброблення	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізні	Подача заготовок у робочу зону
2	Точність деталей	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізні	Збереження положення заготовок під час фіксації
3	Ергономічність	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізні	Зменшення кількості робочого місця

Таблиця 5.6 - Загрози ринку збуту

№	Фактор	Зміст	Реакція
1	Необізнаність споживача	Новий продукт зазвичай викликає негативну реакцію	Відмова у споживанні товару
2	Новий метод	Клієнти звикли до стандартних робочих методів	Закупівля конкурентів
3	Малокваліфіковані робітники	Через не компетентність оператори можуть відмовляти у користуванні	Використання вже вивчених операцій

Таблиця 5.7 - Можливості впровадження

№	Можливість	Зміст	Реакція
1	Реклама	Застосування методів пізнання методу	Зацікавленість
2	Конкурентна ціна	Метод набагато більш дешевий за конкурентів	Спроможність купівлі
3	Попередня освіта	Вивчення операторів та керівництво керуванням методом	Попит буде створювати пропозицію

Таблиця 5.8 - Ступеневий аналіз ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції	Монополія	Новизна проекту Значна різниця вартості
2. За рівнем конкурентної боротьби	Масова	Задіяти логістичні компанії
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева	-
4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова	Компактність пристрою
5. За характером конкурентних переваг	Цінова	Дешева вартість
6. За інтенсивністю	Марочна	-

Таблиця 5.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	SANDVIK DI Ceratizit	3	5	1500	Ручна подача
Висновки	Щільна боротьба	Мала спроможність	Не досить багато факторів, бо принцип дії доволі різний	Спроможність окупити пруткову подачу не завжди є у всіх	Є свої плюси та мінуси

Таблиця 5.10 - Фактор конкуренції

№	Фактор	Обґрунтування
1	Вартість	Ціна пристрою значно менша за пристрій пруткової подачі
2	Точність	На деяких фіксаторах тільки новий пристрій забезпечує достатню точність
3	Економічність	За роботи нового методу використовується максимальна кількість матеріалу
4	Ергономічність	За новою технологією робоча зона значно зменшується

Таблиця 5.11 - Порівняння сильних и слабких сторін нового методу ППД

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг конкурентів						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Вартість	20	S	D	C				
2	Точність	18		C	S	D			
3	Економічність	20	D	S		C			
4	Ергономічність	10			S	D	C		

Таблиця 5.12 - SWOT аналіз

Сильні сторони: Ціна Економічність Точність	Слабкі сторони: Якість Довіра Кваліфікація
Можливості: Маркетинг Освіта Реклама	Загрози: Мала обізнаність Довіра до конкурентів Неприйняття ринком

Таблиця 5.13 - Альтернатива впровадження

№	Альтернатива поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Логістична	Підписання договорів на реалізацію	Від місяця до півроку
2	Рекламна	Вкладання грошей у реалізацію	Від півроку до року
3	Освітня	Розповсюдження інформації	Від місяця до двох років

5.4 Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 5.14 - Вибір цільової аудиторії

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Малі підприємства Один верстат	мала	70%	мала	80%
2	Середні підприємства 4-5 верстат	мала	50%	мала	50%
3	Великі підприємства	середня	30%	велика	40%
Які цільові групи обрано: 1,2,3					

Таблиця 5.15 - Стратегії ринку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренти	Базова стратегія
1	Логістична	Надання на реалізацію маркетинговим компаніям	SANDVIK DI Ceratzit	Лідерства на витратах
2	Рекламна	Постійне присутність на слуху продукта	SANDVIK	Спеціалізації
3	Освітня	Попит створюють самі робітники	SANDVIK Ceratzit	Диференціації

Таблиця 5.16 - Стратегія конкурентної поведінки

№	Чи проект першопроходець?	Цільова аудиторія нова чи вже існуюча?	Чи копіює основні характеристики компанія	Стратегія конкурентної поведінки
1	Логістична	+	+	Більша моржа для реалізаторів
2	Рекламна	-	-	Впровадження власної реклами
3	Освітня	+	-	Задіяння чорної слави нашого продукту

Таблиця 5.17 - Вибір стратегії позиціонування

№	Вимоги аудиторії до товару	Базова стратегія	Ключові конкурентні спроможні позиції
1	Мала вартість	Лідерства на витратах	Найдешевша ціна
2	Достатня точність	Спеціалізації	Найкраща точність на усіх видах патронів
3	Простота	Диференціації	Зручність використання

5.5 Розроблення маркетингової програми

Таблиця 5.18 - Ключові переваги

№	Потреба	Вигода	Переваги над конкурентами
1	Точність	Велика точність	Точність на усіх видах деталей
2	Вартість	Дешеве виробництво	Деякі позиції дорожчі на 1000%
3	Ергономічність	Робота у самому верстаті Просте налагодження Безпечність	Менша робоча площа Не потрібно додатково слідкувати за пристроєм Не має загрози
4	Економічність	Збереження інструменту та його повне використання	Не потрібно додаткових обробок Малі похибки

Таблиця 5.19 - Моделі товару

Рівні товару	Сутність	
Товар за задумом	Інструмент ППД для усіх видів патронів	
Товар у реальному	Властивості	Характеристика
	Сила затиску	До 2000Н
виконанні		
	Якість: Експериментальні сертифіковані дослідження	
	Марка : КБ «ім. М. Шкляренка»	
Товар із підкріпленням	До продажу	
Буде запатентовано у сертифікаційному центрі		

Таблиця 5.20 - Рівень цін

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Межі встановленої ціни
4000	250000	900000	3000-15000

Таблиця 5.21 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту товару	Величина аудиторії	Оптимальна система збуту
Зазвичай потрібні інструменти закуповують вже у своїх постачальників	Пошук нових клієнтів Постійно розкручувати товар	Усі підприємства з верстатами токарного типу ЧПУ	Логістична

Таблиця 5.22 - Концепція маркетингових комунікацій

Поведінка клієнтів	Канали комунікації	Ключові позиції	Рекламна поведінка	Концепція рекламного звернення
Потреба у автоматизації виробництва	Інтернет Телефон Виставки	Точність Вартість Простота	Лідерства на витратах	ППД та економія

5.6 Висновки по розділу

У розробці стартапу ми зрозуміли, що пристрій має великі переваги над існуючими методами поверхневого пластичного деформування. За макетом «Лідерства на витратах» на мою думку, проект зможе реалізуватись на ринку через свої переваги у ціні, точності, економності. Якщо за такого макету проект не буде виходити з великим попитом на ринок, можливо потрібно застосувати тип «Диференціації» за яким цільову аудиторію, буду поступово привчати до такого типу фінішного оброблення.

ВИСНОВКИ

У даній роботі досягнуто результату зменшення матеріало- та енергоємності виробів, що безпосередньо впливає на їх економічність і конкурентоспроможність.

У порівнянні з фінішними операціями оброблення з використанням абразивного інструменту та примусового охолодження зони різання кращими з точки зору екології представляються процеси поверхневого пластичного деформування (ППД), зокрема спосіб обкочування заготовки роликком.

Оброблення методами поверхневого пластичного деформування (ППД) полягає в силовому контактному впливі деформуючого інструмента на поверхню заготовки в умовах їх відносного руху і для нашої деталі «Важіль» ми отримали оптимальні показники шорсткості та міцності поверхонь.

У даній роботі було проведено порівняльний аналіз існуючих методів поверхневого пластичного деформування та обраний найкращий з методів для технологічного забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зарубицкий Е.У. Разработка й дослідження процесу ефективності термо-фрикційної обробки металів. Київ: 1993. С. 76.
2. Покиниелица Н.И. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Кривобоков В.А. Остаточное напряжении в поверхностном слое при термофрикционном резании. Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства. Киев: КПИ, 1998. С.80–83.
3. Гурей І.В. Дослідження технологічних параметрів фрикційного зміцнення сірого чавуну. Машинознавство. 1999. № 11. С. 46–49.
4. Гурей І.В. Напруження, які виникають у базових деталях верстатів при їх поверхневому зміцненні. Труды Одесского политехнического университета. 1999. Вып. 2 (8). С. 84–87.
5. Гурей І.В., Гурей Т.А. Підвищення довговічності ланцюгів конвеєрів фрикційним зміцненням. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 1999. Т. 4. № 3. С. 91–93.
6. Гурей І. В., Гурей Т.А., Плахтій Л.В. Вплив фрикційного зміцнення на товщину поверхневого шару чавуну. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль: ТДТУ, 1999. Т. 4. № 2. С. 45–50.
7. Бабей Ю.И., Швеца В.В., Гурей И.В. Упрочнение поверхностных слоев стальных и чугунных деталей фрикционной обработкой. Вестник машиностроения. 1987. № 10. С. 39–40.
8. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. К. : "Наук. думка", 1988. 237 с.
9. Сизый Ю.А. Теоретические основы управления структурой и параметрами технологических систем фрикционной разрезки: Дис. док. техн. наук: Харьков, 1996.
10. Крагельский І.В., Монін Н.В. Вплив технологічних середовищ та матеріалу інструменту на параметри фрикційного зміцнення. Машиновидавництво. 1998. № 11. С. 30–34.

11. Міхєєв В.В., Сухаріна Н.Н. Вплив імпульсного зміцнення на зносостійкість сталей при різних видах тертя. 4-й міжнародний симпозіум українських механіків у Львові. Тези доповідей. Львів, 1999. С. 136–137.
12. Гурей І.В. Вплив водню на характеристики поверхневого шару при фрикційному обробленні. Вісник ТДТУ. Т. : ТДТУ, 2005. Том 10. № 1. С. 48–53.
13. Кірик М.Д., Рудь А.Є. Установка для поверхневого зміцнення сталевих деталей шляхом обробки високошвидкісним тертям. Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. Львів : РВВ НЛТУ України. 2009. Вип. 19.4. С. 86–89.
14. Lakshminarayanan A.K., Balasubramanian V. Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel. Metals and materials international. 2011. Vol. 17. № 6. P. 969–981.
15. Galvao I., Leal R.M. Loureiro A.. Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets. Journal of materials processing technology. 2013. Vol. 213. Iss. 2. P. 129–135.
16. Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds. Materials & Design. 2009. Vol. 30. Iss. 7. P. 2726–2731.
17. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H., Abbasi S.M. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel. Materials Science and Engineering: A. (2011). Vol. 528. Iss. 4–5, 25. P. 2158–2163.
18. Sidhom H., Ghanem F., Amadou T., Gonzalez G., Braham C. Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance. The international journal of advanced manufacturing technology. 2013. 65. 1–4. P. 141–153.
19. Sipos K., Lopez M., Trucco M. Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel. Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. 2008. 28. 1. 46–50.

20. Багмутов В.П., Захаров И.Н. Формирование структуры поверхностного слоя материала при воздействии концентрированных потоков энергии. *Mechanika*. Kaunas: 2000. № 1. С. 10–17.
21. Wang Z.B., Tao N.R., Li S., Wang W., Liu G., Lu J., Lu K. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel. *Materials science and engineering: A*. 2003. Vol. 352, Iss. 1–2. P. 144–149.
22. Lu K., Lu. J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Materials science and engineering: A*. 2004, Vol. 375–377. P. 38–45.
23. Ba D.M., Ma S.N., Meng F.J., Li C.Q. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of chrome-silicon alloy steel. *Surface and coatings technology*. 2007. Vol. 202. Iss. 2. P. 254–260.
24. Xu Y.H., Peng J.H., Fang L. Nano-crystallization of steel wire and its wear behavior. *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 483–484. P. 688–691.
25. Zhou L., Liu G., Han Z., Lu K. Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel. *Scripta materialia*. 2008. Vol. 58. Iss. 6. P. 445–448.
26. Рудь А.Є. Особливості зміцнення високошвидкісним тертям з попутною подачею заготовки. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2009. Вип. 19.3. С. 120–125.
27. Голубець В.М., Кірик М.Д., Капраль Ю.Р., Рудь А.Є. Фізико-механічні характеристики зміцненого високошвидкісним тертям наноструктурного шару на сталі 45. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : зб. наук.-техн. пр. Львів : РВВ НЛТУ України*, 2012. Вип. 22.13. С. 114–117.
28. Кірик М., Голубець В., Капраль Ю., Рудь А. Встановлення режимів зміцнення високошвидкісним тертям ножів з конструкційних сталей для різання деревини. *Машинознавство*. 2013. № 3–4. С. 28–31.
29. Скобло Т.С., Коломиец В.В., Ридный В.Ф., Ридный Р.В. Управление напряженным состоянием поверхностного слоя – путь к упрочнению. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*

імені Петра Василенка «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». Харків, 2010. Вип. 101. С. 3–7.

30. Манько О.В. Стецько Ю.Б., Білявський М.Л. Утворення білого шару при фрикційно-зміцнюючій обробці тонких пластин. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2005. Вип 1. С. 146–157.

31. Капраль Ю.Р. Ефективність використання дереворізальних ножів, виготовлених з конструкційних сталей та зміцнених високошвидкісним тертям : дисертація кандидата технічних наук : [спеціальність] 05.05.04 Машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт / Ю.Р. Капраль; Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад Національний лісотехнічний університет України. Львів, 2016. 162 с.

32. Андрианов А.Ю., Черников А.П., Щедрин А.В., Прилепин М.М., Алешина С.В., Павлов А.М. Технологические возможности перспективных методов комбинированной деформирующе-режущей обработки СТИН. 2003. № 3.

33. Полюдов О.М. Механіка поліграфічних і пакувальних машин. Вид-во УАД, 2005 180 с.

34. Хмілярчук О.І. Пристрої та інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 2006. № 1-2(11 - 12). С. 133-137.

35. Чехман Я.І. та ін. Друкарське устаткування: Підручник Я.І. Чехман, В.Т. Сенкус, В.П. Дідич, В.О. Босак. Львів: УАД, 2005. 468 с.

36. Шатуrow Г.Ф., Мрочек Ж.А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. Мн.: УП «Технопринт», 2001. 460 с.