



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»



КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності обробки переривчастих отворів деталей
мобільної сільськогосподарської техніки при їх відновленні на базі

ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»

Виконав:

магістрант групи АІ(ТС)-22М _____ Костянтин КОЗАКОВ
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

д.т.н., професор _____ Ігор ШЕПЕЛЕНКО
(науковий ступінь, академічне звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, академічне звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2023 р.

Рецензент:

_____ 2023 р.
(науковий ступінь, академічне звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

Кропивницький – 2023 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 20 «Аграрні науки та продовольство»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма: «Технічний сервіс сільськогосподарської техніки»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Козакова Костянтина Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення ефективності обробки переривчастих отворів деталей мобільної сільськогосподарської техніки при їх відновленні на базі ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»

керівник роботи Шепеленко Ігор Віталійович,

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н.,

(науковий ступінь)

професор

(вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «04» 08 2023 року №42-13

2. Строк подання здобувачем роботи «22» грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали науково-дослідної практики.

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

4.1 Розділ 1. Історія розвитку ТОВ «Калита-Нова». Обґрунтування теми магістерської роботи. Висновки по розділу 1.

4.2 Розділ 2. Існуючі методи фінішної обробки переривчастих отворів. Розкочування як метод фінішної обробки отворів. Обладнання та інструмент при розкочуванні. Аналіз конструктивних рішень роликового інструменту. Аналіз конструкцій комбінованих інструментів. Висновки по розділу 2.

4.3 Розділ 3. Розробка конструкції інструменту для обробки переривчастих отворів. Експериментальні дослідження використання ППД при відновленні корпусів. Дослідження мікрогеометрії поверхні отвору корпусу після розкочування. Дослідження твердості поверхневого шару. Дослідження залишкової деформації. Дослідження напружено-деформованого стану корпусу.

Технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів з використанням розробленої технології. Висновки по розділу 3.

4.4 Розділ 4. Визначення собівартості відновлення корпусу гідропідсилювача. Загальні положення з техніки безпеки та охорони праці при механічній обробці деталей. Висновки по розділу 4.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Технічні та економічні показники сучасних методів обробки. Класифікація способів зміцнення ППД. Схема ППД. Схема конструкції інструменту для обробки переривчастих отворів. Результати експериментальних досліджень. Профілограми поверхонь. Залежності показників мікротвердості від режимів розкошування. Епюри розрахунків напружено-деформуючого стану корпуса.

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Історія розвитку підприємства ТОВ «Калита-Нова» та обґрунтування теми магістерської роботи	10.11.2023	
2	Розділ 2. Літературний огляд за темою досліджень	24.11.2023	
3	Розділ 3. Результати наукових досліджень	05.12.2023	
4	Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийнятих технічних рішень та охорона праці при обробці деталей	12.12.2023	
5	Оформлення ілюстративного матеріалу	22.12.2023	

Магістрант _____
(підпис)

Козаков К.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор ШЕПЕЛЕНКО
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена підвищенню ефективності обробки переривчастих отворів деталей мобільної сільськогосподарської техніки.

Метою представленої роботи є підвищення якості обробки переривчастих отворів деталей мобільної сільськогосподарської техніки.

Об'єкт дослідження – технологічний процес відновлення корпусу гідропідсилювача рульового керування.

Предметом дослідження є встановлення закономірностей зміни показників якості поверхневого шару від операції розкочування.

З'ясовано, що обробка отворів, що мають переривчасту поверхню, є одним з найбільш важких і трудомістких технологічних процесів. Так, на прикладі корпусу гідропідсилювача рульового керування показано, що необхідна якість поверхні отвору досягається застосуванням складної та енергоємної технології, яка базується на обробці різанням.

Доведена ефективність використання способів ППД при обробці переривчастих отворів з точки зору трибологічних характеристик, енерговитрат та вартості технології. Відмічені переваги операції розкочування серед інших.

Виконано аналіз конструкції інструментів для розкочування та вимоги щодо оцінки їх роботи.

Експериментальні дослідження показали ефективність використання розкочування при обробці переривчастих отворів. Доведена можливість отримання якісного поверхневого шару після обробки розкочуванням отворів чавунних корпусів при ремонті.

Зроблені технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів гідропідсилювачів з використанням розробленої технології.

Виконано розрахунок собівартості відновлення деталі.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 69 сторінок тексту, 27 рисунків, 4 таблиці.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....

РОЗДІЛ 1. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВА ТОВ «КАЛИТА-НОВА» ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1. Основні етапи розвитку ТОВ «Калита-Нова».....

1.2. Обґрунтування теми магістерської роботи.....

1.5. Висновки по розділу 1.....

РОЗДІЛ 2. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Існуючі методи фінішної обробки переривчастих отворів

2.2. Поверхнєве пластичне деформування. Різновиди процесу для
зміцнення деталей

2.3. Розкочування як метод фінішної обробки отворів ...

2.4. Обладнання та інструмент при розкочуванні ...

2.4.1 Аналіз конструктивних рішень роликів інструменту

2.4.2 Аналіз конструкцій комбінованих інструментів

2.5. Висновки по розділу 2.....

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Розробка конструкції інструменту для обробки переривчастих
отворів

3.2. Експериментальні дослідження використання ППД при
відновленні корпусів ГРК

3.2.1 Дослідження мікрогеометрії поверхні отвору корпусу після
розкочування

3.2.2 Дослідження твердості поверхневого шару

3.2.3 Дослідження залишкової деформації

3.2.4 Дослідження напружено-деформованого стану корпусу

3.3. Технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів ГРК з використанням розробленої технології

3.4. Висновки по розділу 3

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Визначення собівартості відновлення корпусу гідропідсилювача

4.2. Загальні положення з техніки безпеки та охороні праці при механічній обробці деталей

4.3. Висновки по розділу 4.....

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

Вступ

«Експлуатаційні властивості деталей машин залежать від точності їх виготовлення і, значною мірою, визначаються якістю їх поверхні. В свою чергу, якість поверхні деталей машин визначається сукупністю характеристик шорсткості поверхні, фізико-механічного стану та мікроструктури металу поверхневого шару і залишкових напружень, які сформовані в матеріалі деталі під час її обробки» [1].

В більшості випадків при експлуатації руйнування деталей машин розпочинається саме з поверхні (зношування, втома, контактна взаємодія та інше). Основним напрямком у підвищенні втомлювальної міцності й зносостійкості деталей є застосування обробки поверхневим пластичним деформуванням, у результаті якої міцність може бути збільшена на 25-90%, а поверхнева твердість – на 40-70% у порівнянні з деталями, які не підлягають пластичній обробці.

Фінішну обробку деталей поверхневим пластичним деформуванням відносять до прогресивних, енергозберігаючих технологічних процесів. Перевага методу складається у можливості одержувати необхідну шорсткість поверхні у поєднанні зі зміцненням поверхневого шару при високій продуктивності обробки [2].

Особливу увагу потребує обробка отворів, що мають переривчасту поверхню. Обробка таких поверхонь є складним процесом, а розробка технологічних процесів вимагають додаткових досліджень. При впровадженні технологічного процесу обробки отворів, які мають переривчасті поверхні, виникають питання, пов'язані з вибором типу інструмента, його проектуванням і розробкою технології фінішної обробки.

РОЗДІЛ 1. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВА ТОВ «КАЛИТА-НОВА» ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1. Основні етапи розвитку ТОВ «Калита-Нова»

Науково-виробнича фірма «Калита» була зареєстрована як ТОВ 15 листопада 1993 року. Спочатку підприємство спеціалізувалося на відновленні колінчастих валів методом електродугового напилення.

Це дозволило у 1994 році новоствореній НВФ «Калита» підписати контракт з Державним інноваційним фондом на виконання інноваційного проекту: «Технологія відновлення колінчастих валів електродуговим напиленням композиційними покриттями». Проект був реалізований за шість місяців і ще через місяць вийшов на проектну потужність.

Вже в кінці 1994 року розпочалися роботи з введення в експлуатацію лінії з ремонту блоків циліндрів двигунів внутрішнього згоряння. З цією метою керівництвом НВФ «Калита» було придбано та введено в експлуатацію спеціальне обладнання, а також розроблено технологію хонінгування циліндрів із застосуванням сучасних інструментів, наприклад, алмазні різці та алмазні хонінгувальні бруски.

Відносні виробничі успіхи підприємства дозволило у 1995 році впровадити:

- дільницю з ремонту та відновлення головок блоків циліндрів двигунів;
- нову технологію відновлення розподільчих валів методом ремонтних розмірів.

У 1997 році керівництво НВФ «Калита» організувала дільницю з ремонту паливної апаратури, розширюється спеціалізація по відновленню пар тертя деталей машин, впроваджено спеціальний прецизійний

універсальний координатно-розточувальний верстат для ремонту різних корпусних деталей і втулок валів в зборі.

Наприкінці 1998 року на підприємстві НВФ «Калита» впроваджено нову технологію ремонту блоків циліндрів двигунів із застосуванням новітньої технології фірми «NEWAY». Окрім цього, для навчально-наукової роботи створюється відділ з ремонту карбюраторів ДВЗ із сучасним технологічним обладнанням, яке дозволяє імітувати роботу карбюраторів в умовах близьких до умов реальної роботи двигуна.

У наступному 1999 році з'явилася зварювально-рихтувальна дільниця, а в невдовзі, на початку 2000 р. – дільниця для шиномонтажу та балансування коліс. Для цієї мети підприємство придбало верстат для правці зварних коліс автомобіля.

У 2001 році підприємство почало виконувати роботи з ремонту ходових частин легкових автомобілів. На той час послугами НВФ «Калита» користувалися біля 240 власників автомобіля (період 1999 – 2001 рр.)

Але починаючи з 2003 р. ринок послуг у сфері обслуговування автомобілів у м.Кіровоград (зараз м.Кропивницький) значно розширювався. Тому гостро стало питання зміни вектору розвитку підприємства.

Новим етапом розвитку стало реорганізація підприємства, поява нових власників. Таким чином, заявилося нова форма власності ТОВ та нова назва – «Калита-Нова»

«На сьогодні «підприємство ТОВ «Калита-Нова» відноситься до автосервісних підприємств, що виконують функції, пов'язані з підтриманням автомобілів в справному технічному стані. Основним видом діяльності організації є технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів. Проходячи практику на такому підприємстві здобувачі вищої освіти мають можливість побачити окремі технології ТО і ремонту автомобілів, а також закріпити теоретичні знання, отриманні під час навчання. Матеріально-технічна база підприємства дозволяє виконувати ремонт базових деталей автомобілів» (рис.1.1)» [3].



a)



б)



в)

Рис.1.1. Обробка базових деталей автомобілів на підприємстві ТОВ «Калита-Нова»

1.2. Обґрунтування теми магістерської роботи

«У зв'язку з великою вартістю нової техніки кількість машин, що надходять на ремонт у центральну ремонтну майстерню збільшується. Для багатьох сільськогосподарських машин запасні частини відсутні. Більшість наявних у продажу запасних частин мають або невисоку якість, або велику вартість. Тому, виникає необхідність ремонту зношених деталей для відновлення їх працездатності» [4].

Обробка точних отворів, що мають переривчасту поверхню, є одним з найбільш важких і трудомістких технологічних процесів. Така поверхня утворюється при наявності пазів, вибірок, а також при перетинанні оброблюваного отвору з іншими і т.д.

До таких деталей відноситься корпус гідропідсилювача рульового керування (ГРК), до конструктивної особливості якого слід віднести велике співвідношення довжини до діаметру, переривчастий характер отвору, високі технічні вимоги за точністю.

При виготовленні та відновленні корпусів ГПРК необхідна якість поверхні отвору досягається застосуванням складної та енергоємної технології, яка базується на обробці різанням. В ремонтному виробництві доцільне й потрібне використання більш простого та енергозберігаючого способу. Таким способом може бути технологія, яка містить обробку поверхневим пластичним деформуванням.

Розробка технології відновлення корпусу ГПРК, а також оснащення для її здійснення є, на нашу думку важливою і актуальною задачею. Тому у даній магістерській роботі запропоновано застосування ресурсозберігаючої обробки, одного з методів поверхневого пластичного деформування – розкочування. Враховуючи переривчасту поверхню отвору корпусу передбачається застосування роликового сепараторного інструменту з радіальною подачею роликів. Використання такої схеми обробки дозволить уникнути кінцевого ефекту та викришування відсічних кромek.

1.3. Характеристика об'єкту дослідження

З різноманітних деталей гідроагрегатів найбільш технологічно складним при ремонті є обробка отвору під золотник, тому що воно характеризується деякими конструктивними особливостями корпусу. До цих складнощів з технологічною точки зору слід віднести: велике співвідношення довжини до діаметру, переривчастий характер отвору, високі технічні вимоги за точністю.

Традиційно при ремонті на підприємствах працездатність прецизійної пари «корпус-золотник» відновлюють декількома способами.

При досить незначному зносі отвору під золотник корпусу розподільника його відновлюють притиранням вручну чавунним притиром з пастою ГОЇ.

При значному зносі корпус розвертають вручну розверткою власного виготовлення, попередньо вимірюючи калібром, під який розмір треба розвернути, а потім притирають вручну. При цьому способі золотники відновлюють насталуванням або підбирають за розміром отвору корпусу.

Спрацьовані отвори корпусів можна відновлювати також перекомплектуванням пари «корпус-золотник» з наступною підгонкою; протягуванням, розточуванням або розвертанням з наступним притиранням; алмазним хонінгуванням.

Аналіз літературних джерел дозволив виділити три основних напрямки відновлення працездатності з'єднання «корпус - золотник» [5].

1. Перекомплектування. Відновлення перекомплектуванням має низку суттєвих недоліків, а саме: ремонтний фонд використовується частково, а з'єднання мають низький ресурс [6].

2. Використання способів механічної чистової обробки: притирання, протягування, розточування, алмазне хонінгування. При протягуванні, у багатьох випадках після обробки ріжучими протяжками у поверхневому шарі виникають несприятливі розтягуючі залишкові напруження, що знижує міцність від втоми та інші експлуатаційні характеристики деталей машин. Застосування механічної обробки спрямоване на видалення слідів зносу та забезпечення потрібної шорсткості та точності поверхні при обробці. Але, ці методи не забезпечують належної твердості поверхні.

3. Підвищення зносостійкості поверхні отвору використанням зміцнювальної обробки, зокрема, використання сучасних технологій поверхнево-пластичної обробки при відновленні.

У представленій магістерській роботі в якості об'єкту дослідження обрано корпус гідропідсилювача рульового керування, який має переривчасті отвори (рис.1.2).

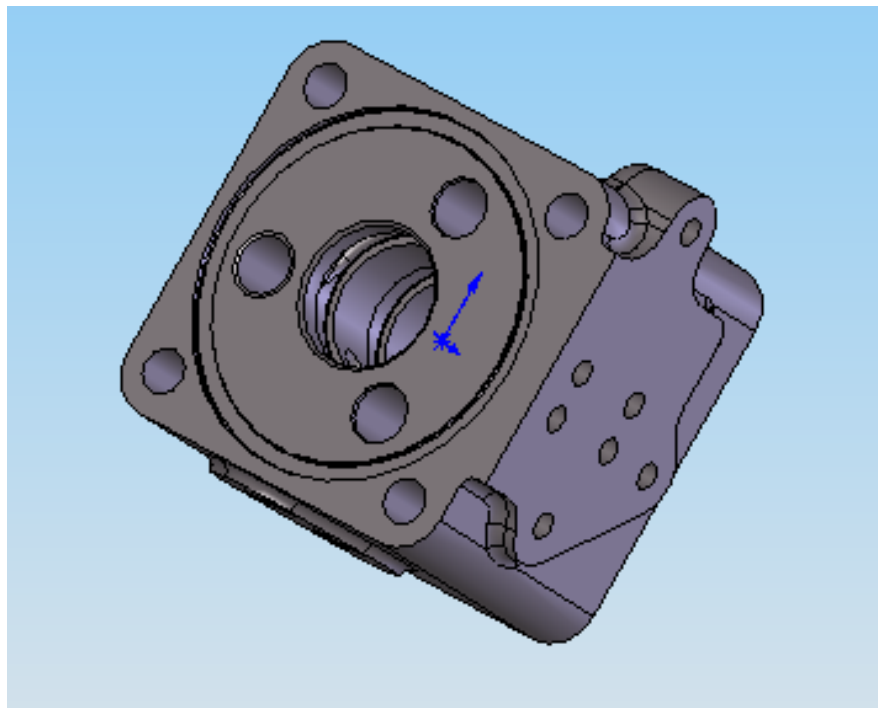


Рис.1.2. Розрахункова модель корпусу ГРУ

1.4. Призначення і принцип роботи золотникових розподільників тракторних гідравлічних систем керування

Корпус розподільника (рис.1.3) виготовлений із сірого чавуну СЧ 20 ГОСТ 1412-85(НВ 170...241), який має границі міцності: при розтягуванні – 200 МПа, при згині – 400 МПа.



Рис.1.3. Корпус гідропідсилювачів рульового керування

Хімічний склад чавуну СЧ 20 та деякі фізико-механічні властивості наведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад у % та механічні властивості сірого чавуну СЧ20 [7]

C	Cr	Si	<u>Mn</u>	<u>Ti</u>	HB, <u>ГПа</u>	σ_B , ГПа	σ_T , ГПа
2,65	0,10	0,10	0,5	0,08	1,7...1,9	0,20	-

У отворі корпусу розподільника є три кільцеві проточки, до яких по каналам підводиться і відводиться робоча рідина. Отвір корпусу розподільника гідропідсилювача обробляється за 9 квалітетом, має розмір $\varnothing 34^{+0,060}$ мм і шорсткість поверхні $R_a=0,2$ мкм. До прецизійних отворів корпусів гідропідсилювача рульового керування за технічними вимогами ставляться жорсткі вимоги: точність діаметрального розміру – не нижча за 0,06 мм; похибка геометричної форми (овальність та конусоподібність) – у межах допуску на групу, тобто не більше за 0,006 мм.

Золотник виготовлений зі сталі ШХ 15 ГОСТ 801-78. Золотник має циліндричну форму із двома кільцевими проточками. Контактуюча з отвором корпусу поверхня золотника гідропідсилювача має діаметр $\varnothing 34^{+0,048}_{-0,012}$ мм і шорсткість поверхні $R_a = 0,63$ мкм. Технічними вимогами ставляться вимоги щодо забезпечення гостроти кромки. Радіальний зазор у парі складає $\delta = D_k - D_z = (0,006 - 0,012) \cdot 10^{-3}$ м. Необхідний зазор у золотниковій парі забезпечується селективним складанням, за яким деталі попередньо сортуються на 10 розмірних груп із кроком 0,006 мм. Розміри отвору корпусу ГРК показані на рис.1.4.

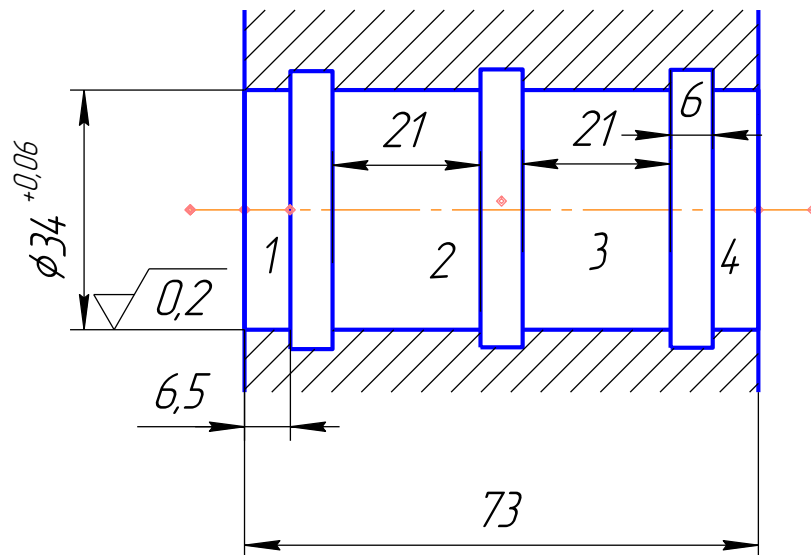


Рис.1.4. Розміри отвору корпусу ГРК

Умови навантаження золотникової пари обумовлені тим, що вмикання гідропідсилювача здійснюється одночасно осьовим переміщенням золотника та подоланням опору попередньо стисненої центруючої пружини. При цьому, золотник сприймає як осьове навантаження від центруючої пружини так і тиск робочої рідини.

Особливістю роботи пари золотник-корпус є незначні переміщення (з різною амплітудою та частотою) золотника відносно корпусу, під дією змінного тиску робочої рідини. При пульсації тиску робочої рідини золотник здійснює вібраційні переміщення в осьовому напрямі. Амплітудне переміщення золотника $1,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Пульсація робочої рідини призводить до вібраційних багаторазових переміщень в осьовому напрямі, внаслідок чого за даними виникає явище схоплення на ділянках контакту. Особливості роботи золотникової пари підтверджені багатьма дослідженнями, які вказують на втомленісний характер зносу деталей пари.

За даними, в умовах експлуатації технічний стан гідроагрегатів ГПР погіршується, що спричиняє спрацювання підшипників валу черв'яка. Внаслідок цього, золотник зміщується, перекошується, контактує з корпусом.

Це, у свою чергу, призводить до інтенсивного зносу отвору корпусу та золотника у діаметрально протилежних місцях. Причинами зносу є великі питомі тиски в місцях контакту поверхонь деталей золотникової пари та осцилюючі відносні рухи золотника. Зміна форми і розміру деталей золотникової пари впливають на ймовірність виникнення несправностей при їх роботі.

Для визначення способу підвищення довговічності деталей важливе значення має встановлення характеру й величини зношування.

За даними досліджень [5], величина зносу отвору не перевищує 0,1мм, знос корпусу майже у 3 рази більший за знос золотника (матеріал корпусу – чавун СЧ-20, золотника – сталь ШХ-15), тому довговічність розподільника в більшій мірі лімітується зносом корпусу.

Складність вивчення кавітаційної ерозії обумовлена як швидким протіканням самого процесу кавітації, так і різноманіттям явищ, що мають місце в різних матеріалах, підданих багаторазовому впливу поля пухирців, що замикаються.

Тому характер кавітаційних руйнувань із однієї сторони залежить від енергії й концентрації кавітаційних пухирців і від міцнісних характеристик матеріалів з іншої сторони.

Природа процесів зношування вказує, що при виборі способу відновлення корпусу необхідно прагнути до зменшення шорсткості отвору й створення в поверхневому шарі напружень стиснення, що підвищить здатність поверхні чинити опір захопленню й утомі. При цьому повинна забезпечуватися висока точність обробки.

1.3. Висновки по розділу 1

Виконання розділу 1 магістерської роботи дозволив встановити наступні висновки:

1. Основним видом діяльності ТОВ «Калита-Нова» є технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів. Наявність технічного оснащення та кваліфікованих кадрів дозволяє якісно виконувати підприємству свої функції.

2. Аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати, що обробка отворів, що мають переривчасту поверхню, є одним з найбільш важких і трудомістких технологічних процесів.

3. При виготовленні та відновленні корпусів гідропідсилювачів рульового керування необхідна якість поверхні отвору досягається застосуванням складної та енергоємної технології, яка базується на обробці різанням. Тому цілком зрозуміло, що доцільним виглядає використання більш простого та енергозберігаючого способу. Таким способом може бути технологія, яка містить обробку поверхневим пластичним деформуванням.

РОЗДІЛ 2. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Існуючі методи фінішної обробки переривчастих отворів

На сьогодні для виготовлення та відновлення переривчастих отворів деталей машин, в якості фінішної (чистої) операції, застосовуються різні технологічні методи обробки та пристрої для їх здійснення. В роботі [2] надана порівняльна оцінка різних методів зміцнення для обробки таких поверхонь.

Таблиця 2.1 – Порівняльна оцінка методів зміцнення переривчастих отворів [2]

Методи зміцнення	Точність обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Твердість поверхні	Залишкові напруження	Товщина зміцненого шару	
					min	max
Різання	4 - 5	5 - 20	Збільшується на 20...30%	Напруження стиснення 30...70	0,05	0,5
Алмазне згладжування	Зберігається від попередньої обробки	0,08 - 0,63	Збільшується на 20...50%	Напруження стиснення 30...70	0,01	0,2
Поверхнєве пластичне деформування	1 - 3	0,08 - 0,32	Збільшується на 30...60%	Напруження стиснення 60...80	0,3	5,0
Залізнення	Зберігається від попередньої обробки	5 - 20	НВ 120 - 600	-	0,2	5,0

Аналіз даних, наведених в табл.2.1 свідчить про те, що методи поверхневого пластичного деформування (ППД) дозволяють забезпечити шорсткість поверхні $R_a = 0,08 - 0,32$ мкм та збільшити твердість на 30...60 %.

Розглянемо основні технологічні методи, використання яких можливе при фінішної обробки переривчастих отворів.

Протягування. Переваги протягування отворів добре видно при співставленні його з іншими методами обробки [7, 8].

При цьому, при обробці деталей в технології машинобудування протягуванням, прийнято розрізняти чотири основні етапи: чорновий, напівчистовий, чистовий і фінішний. Так, при отриманні параметрів обробляемого на свердлильному верстаті отвору по 7-му квалітету і з шорсткістю $R_a = 0,16 - 0,63$ мкм, необхідно виконати всі чотири етапи обробки. Чорновий етап – зенкерування, напівчистовий – попереднє розвертання, чистовий – остаточне розвертання й фінішний – притирання чи доводка. При обробці цієї ж заготовки на протяжному верстаті всі чотири етапи виконують одним інструментом - комбінованою протяжкою – за один робочий хід. Виконання декількох етапів обробки за один робочий хід інструменту є особливістю протягування і забезпечує високу продуктивність процесу.

Висока ефективність процесу протягування пояснюється наступними основними його характеристиками: 1) великою довжиною ріжучих кромek, що одночасно беруть участь у різанні; 2) виконанням одним інструментом за один робочий хід декількох етапів обробки.

Можливості процесу протягування визначаються насамперед можливостями інструменту. Стабільне одержання малої шорсткості поверхні ($R_a = 0,63 \div 1,25$ мкм) і високих фізико-механічних властивостей поверхневого шару практично не можна забезпечити без твердосплавних вигладжувальних або деформуючих елементів, що об'єднані в одному комбінованому інструменті з ріжучою протяжкою, або виконані як окремий

протяжний інструмент. Поява деформуючого протягування дала можливість для високоефективної, майже безвідходної, технології виготовлення отворів.

Затуплення ріжучої кромки викликає підвищення інтенсивності і порушення стабільності процесу наростоутворення. Це призводить до збільшення шорсткості. Саме погіршення шорсткості протягнутої поверхні в багатьох випадках є критерієм зносу протяжки. Якість обробленої поверхні, крім шорсткості, обумовлюється ще й фізико-механічними властивостями поверхневого шару, зокрема, зміцненням (наклепом) і залишковими напруженнями. Ступінь наклепу (підвищення твердості) поверхневого шару після протягування може досягати 150-200% при глибині наклепу 0,1 мм. У багатьох випадках після обробки ріжучими протяжками в поверхневому шарі виникають несприятливі розтягуючі залишкові напруження, що знижують міцність від втоми та інші експлуатаційні характеристики деталей машин.

Хонінгування. Хонінгування являє собою процес остаточної обробки, в основному, внутрішніх поверхонь деталей абразивними або алмазними брусками, що закріплені на хонінгувальній головці, установленій на верстаті. Головка здійснює обертальний і зворотно-поступальний рухи. Бруски з заданим зусиллям (тиском) притискаються в радіальному напрямку до оброблюваної поверхні.

Особливостями процесу хонінгування є: велика поверхня контакту різального інструмента з оброблюваною поверхнею; мала величина тиску брусків і низькі швидкості різання; значна кількість одночасно працюючих зерен; низька температура в зоні різання.

У більшості випадків хонінгування виконують після внутрішнього шліфування, хонінгування отворів у нетермооброблених деталях – після розточування або протягування. Хонінгування забезпечує обробку по 7-8-му квалітетах, а алмазне хонінгування – за 5-6-им квалітетах. Хонінгування дозволяє виправляти значні відхилення форми оброблюваного отвору як у повздовжньому, так і в поперечному перерізах: при обробці в одну операцію брусками з електрокорунду і карбіду кремнію забезпечуються допуски 6-8

ступенів точності, що складають 8-25 мкм для діаметрів отворів 30-120 мкм; при обробці алмазними брусками в одну операцію забезпечуються допуски 4-6-го ступенів точності (3-10 мкм), у дві операції – допуски 2-4 ступенів точності (1,2-4 мкм).

При чорновому хонінгуванні зі зняттям припуску 0,2 - 0,5 мм досягається параметр шорсткості $R_a = 1,25 \div 2,5$ мкм, при чистовому хонінгуванні зі зняттям припуску 0,1 - 0,15 мм – $R_a = 0,32 \div 0,63$ мкм, при тонкому хонінгуванні дрібнозернистими (M20-M14) брусками – $R_a = 0,084 \div 0,16$ мкм.

У зв'язку з тим, що інструмент (хонінгувальна головка з закріпленими в ній абразивними брусками) або заготовка, яка обробляється, встановлюється на верстаті шарнірно, точність обробки залежить, в основному, тільки від жорсткості системи інструмент – деталь. При хонінгуванні до верстатів і пристосувань висуваються значно менші вимоги, чим при інших методах чистової обробки.

На відміну від інших видів фінішних операцій, де якість обробки, в значній мірі, залежить від точності і жорсткості верстата, при хонінгуванні точність, продуктивність і якість обробки визначаються конструкцією головки і способом її кріплення.

Застосовується кілька схем закріплення головок і деталей, які обробляються, при операціях хонінгування. Найбільш поширені наступні:

- жорстке закріплення головки і плаваюче деталі в пристосуванні;
- жорстке закріплення деталі і плаваюче (одне- і більш) шарнірне закріплення головки;
- жорстке закріплення головки і деталі, яка обробляється, в плаваючому пристосуванні.

Усі ці схеми забезпечують збереження положення осі отвору деталі після попередньої операції.

Хонінгуванням формується поверхневий шар деталей як по шорсткості, так і по фізичним властивостям. У ньому виникають стискаючі залишкові

напруження, які сприятливо впливають на експлуатаційні показники деталей. Ступінь зміцнення поверхневого шару може досягати 40%, а глибина наклепаного шару 12 - 15 мкм.

При відновленні отворів корпусу алмазним хонінгуванням немає потреби в попередньому виправленні геометрії спрацьованих отворів на відміну від відновлення притиранням. При обробці використовують вертикально-хонінгувальні верстати ОФ – 38А або 3Б833 із спеціальним пристроєм для закріплення корпусу та хонінгувальною головкою з алмазними брусками АБХ $90 \times 6 \times 3,5 \times 1,5$ R 12,5 ; АСП – 60/40 М₁ 100%.

Але слід зазначити, що величина припуску під час попереднього хонінгування повинна бути не менше як на 30% більша за величину похибки геометричної форми відновлюваного отвору. Тільки при цьому забезпечується потрібна точність (в межах 0,004 мм) та видалення слідів спрацювання. Якщо є задирки на поверхні отвору, величину припуску збільшують. Припуск для остаточного хонінгування становить 0,005...0,008 мм. Похибка геометричної форми отворів допускається до 0,004 мкм.

Через високу вартість оснащення та інструмента, складності перенастроювання на інші розміри деталі алмазне хонінгування застосовують в основному в масовому і багатосерійному виробництві.

Розкочування. Серед сучасних методів фінішної обробки металів найбільше поширення знайшли методи ППД, які полягають у використанні місцевої пластичної деформації, яка створюється у верхньому шарі деталі, внаслідок певної контактної взаємодії твердого, гладкого інструменту (у форми кульки, диску, ролика або іншого) з поверхнею, що обробляється.

Основним обмеженням для матеріалів при ППД є величина відносного подовження при розтягуванні, а також твердість матеріалу деталі, що обробляється. Матеріали з відносним подовженням δ меншим за 6 %, як правило, не обробляються або важко обробляються за допомогою методу поверхневої пластичної деформації. Останнім часом було встановлено, що це обмеження не відноситься до сірого і деяких легованих чавунів, які,

незважаючи на малу величину δ , можна піддавати поверхнево- пластичній обробці.

До основних недоліків ППД слід віднести:

- малу розмірну геометричну точність, особливо для пружної поверхневої пластичної обробки, що не поліпшує істотно точність деталі після попередньої обробки;
- обмеження по твердості матеріалу, який обробляється, у випадку поверхневої пластичної деформації коченням сталевим інструментом (практично HRC до ~ 45);
- трудомісткий вибір правильних параметрів обробки;
- можливість виникнення під час процесу ППД лущення поверхні при застосуванні великих зусиль притискання;
- необхідність ретельної (без задирів і наростів), а також точної за розмірами, попередньої обробки через можливість виникнення зон нерівномірного обтискання, що особливо важливо для довгих тонкостінних виробів.

«Необхідно враховувати, що обробка, заснована на пластичному деформуванні тонкого поверхневого шару, має, в порівнянні з обробкою різанням, шліфуванням, поліруванням, доводкою, ряд безумовних переваг» [10]. До них слід віднести:

- «- зберігається цілість волокон металу й утворюється дрібнозерниста структура-текстура в поверхневому шарі;
- відсутнє шарування оброблюваної поверхні часточками шліфувальних кругів, полірувальних паст; відсутні термічні дефекти;
- стабільні процеси обробки, що забезпечують стабільну якість поверхні;
- можна досягати мінімального параметру шорсткості поверхні ($R_a=0,1\ldots 0,05$ мкм і менш) як на термічно необроблених сталях, кольорових сплавах, так і на високоміцних матеріалах, зберігаючи вихідну форму заготовок;

- можна зменшити шорсткість поверхні в декілька разів за один робочий хід;
- створюється сприятлива форма мікронерівностей з більшою часткою опорної площі;
- можна утворювати регулярні мікрорельєфи з заданою площею поглиблень для затримки мастильного матеріалу;
- створюються сприятливі стискаючі залишкові напруження у поверхневому шарі;
- плавно і стабільно підвищується мікротвердість поверхні» [11].

Зазначені й інші переваги методів ППД забезпечують підвищення зносостійкості, опору утомі, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей деталей на 20-50 %, а в деяких випадках - у 2-3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу і призначення оптимальних режимів обробки).

У порівнянні із традиційними фінішними обробками ППД дозволяє досягти більшого економічного ефекту (рис.2.1). Джерелом ефекту є можливість реалізації технологічного процесу ППД за один прохід та об'єднання розточування із ППД.

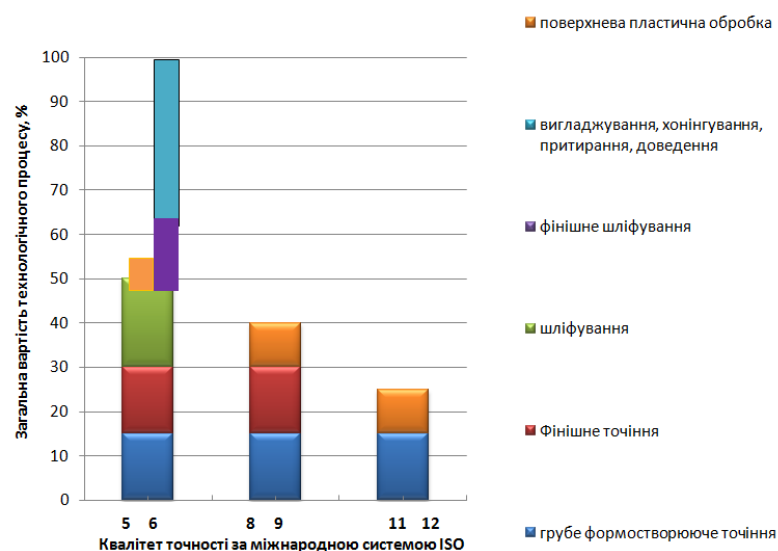


Рис.2.1. Частка вартості ППД та інших методів обробки в загальній вартості обробки в залежності від необхідної точності деталі [2]

Операції ППД, особливо при використанні багатoeлементних головок, не тільки дешевші, а й менш трудомісткі. Так, наприклад, у випадку обробки точних отворів, використання поверхневої пластичної обробки є найбільш економічною технологічною операцією з усіх можливих. Це підтверджують і дослідження [2], результати яких наводяться в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння трудомісткості та вартості різноманітних методів чистової обробки отворів [2]

Метод кінцевої обробки	Відносна вартість операції	Трудомісткість операції, хв.
ППД багатoeлементним твердим інструментом	1	1,67
Точне розточення на токарно-фрезерному верстаті	1,38	1,82
Шліфування	2,07	2,88
Точне розточення на токарному верстаті	2,76	3,12
Розточення різцем	3,79	3,42
Розвертання	4,07	5,28

З цих даних виходить, що застосування багатoeлементного інструменту для поверхневої пластичної обробки отворів знижує трудомісткість обробки в три рази порівняно з розвертанням.

Аналіз вартості обробки основних (традиційних) методів чистової обробки (рис.2.2) підтверджує, що вартість методів ППД приблизно у два-три рази нижча.

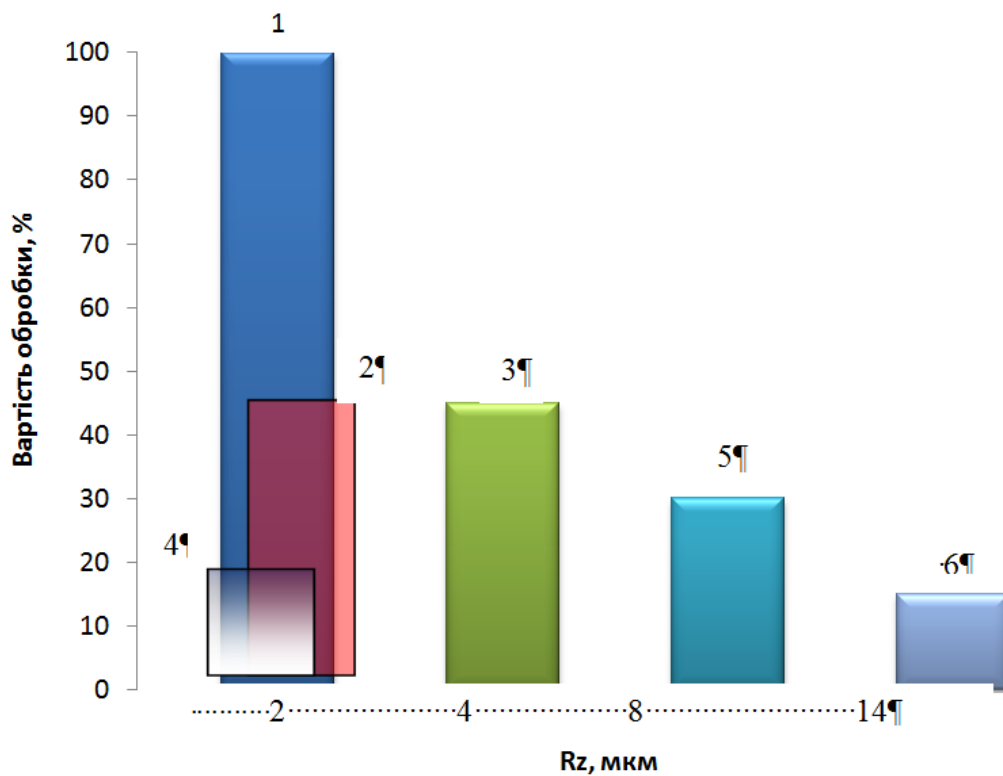


Рис.2.2. Залежність вартості обробки від необхідної шорсткості поверхні, що обробляється різними методами: 1 – притирання, доведення, полірування; 2 – чистове шліфування; 3 – шліфування; 4 – поверхнева пластична обробка; 5 – чистове точіння; 6 – грубе точіння [2]

2.2. Поверхневе пластичне деформування. Різновиди процесу для зміцнення деталей

Поверхневе пластичне деформування (ППД), здійснюване при температурах, менших за температуру рекристалізації - технологічно простий і ефективний метод поліпшення властивостей поверхневого шару деталей - знаходить широке застосування у виробничій практиці. Використання ППД дозволяє при мінімальних витратах підвищити зносостійкість, опір утомі в корозійному середовищі, одержувати мінімальну шорсткість поверхні без істотної зміни розмірів і виключення насичення шаруючим абразивом, підвищувати припрацьовуваність. Простота методу, дешевина роблять його придатним для всіх металів і сплавів (виключення становить олово й деякі інші метали, у яких температура рекристалізації

нижче кімнатної) і практично доступним для зміцнення деталей будь-якої конфігурації. Крім того, механічні способи зміцнення поверхневим наклепом мають ще ряд переваг перед іншими методами поверхневого зміцнення: границі наклепаної поверхні не є зонами зниженої міцності (перенаклеп, як шкідливе явище, не розглядається), як це, наприклад, має місце при поверхневому загартуванні й деяких інших методах; ефективність наклепу значно менше залежить від режиму обробки, чим це має місце при інших видах поверхневого зміцнення; можливість створювати зміцнені шари металу в широких межах - від 0,28 мм при гідродробеструйній обробці до 40-50 мм при вибуху; при підвищенні опору утомі ударна в'язкість матеріалу знижується значно менше, ніж при інших методах поверхневого зміцнення. Зміцнюються ППД як деталі малих, так і дуже великих розмірів.

Поверхнєве пластичне деформування ефективно насамперед як засіб підвищення опору утомі деталей. Границі витривалості деталей з концентраторами напружень можуть бути підвищені за рахунок ППД в 1,5-2 рази, різьбових деталей різних розмірів і шпонково-пресових з'єднань - у три й більше рази. У багато разів підвищується довговічність зміцнених ППД деталей. Так, зміцнення дрібеструйним наклепом дозволяє збільшити термін служби зварювальних швів на 310 %, колінчатих валів двигунів - на 900 %, спіральних пружин - на 1370 %, ресор вантажних автомобілів - на 1200 %, крупномодульних зубчастих коліс - на 1400 %, ресор легкових автомобілів - на 400%.

Економічна ефективність зміцнення ППД створюється в основному більшим строком експлуатації й, як наслідок цього, скороченням витрати запасних частин, заміною дорогих легованих сталей більше дешевими, зменшенням витрати металу й зниженням ваги машин. Це особливо важливо у зв'язку з жорсткістю вимог до матеріалоемності конструкцій.

Розроблено й успішно застосовуються у виробничій практиці численні способи зміцнення деталей машин і елементів конструкцій поверхневим пластичним деформуванням (рис.2.3). Відрізняються вони в основному

схемою силового впливу деформуючого елемента на оброблювану поверхню. За цією ознакою можна виділити вісім груп процесів ППД. До них відносяться групи статичного й деформуючого ППД, ударної обробки з різною орієнтації деформуючих елементів і комбінованих способів. Способи статичного ППД припускають створення деформаційного зусилля від інструмента шляхом безперервного контакту з деталлю, а динамічні - ударна дія на деталь робочих тіл або інструмента. Динамічні способи мають певні переваги й можуть застосовуватися у випадках, коли статичні способи застосувати не можна.

Відцентрово-кульковий спосіб зміцнення використовується для остаточної поверхневої обробки таких деталей, як колінчасті вали, гільзи циліндрів, поршневі кільця, вкладиші підшипників, торсіонні вали. Цим способом можна обробляти як внутрішні, так і зовнішні поверхні деталей із чорних і кольорових металів. Спосіб зміцнення відрізняється високою продуктивністю й не вимагає складного устаткування. Шорсткість поверхні при відцентрово-кульковій обробці знижується на один-два класів. Глибина наклепу на м'яких матеріалах може бути в межах 0,8-1,5 мм, а на матеріалах середньої твердості - 0,4-0,8 мм.

Пластична деформація викликається системою зовнішніх сил, що створюють на поверхню деталі тиск, який перевищує величину напруження пластичної текучості матеріалу, з якого виготовлена деталь (рис.2.4). Процес протікає при кімнатній температурі, спричиняючи, крім переміщення нерівностей, також і обтискання верхнього шару поверхні деталі. Результатом переміщення («текучості») нерівностей поверхні, в результаті впливу на оброблювану поверхню гладкого і практично недеформуючого інструменту, є зниження шорсткості поверхні, у той час як наслідком обтискання є істотна зміна властивостей верхнього шару деталі. Ці явища, хоча і проходять одночасно, можуть мати різну інтенсивність у залежності від необхідного основного ефекту обробки.

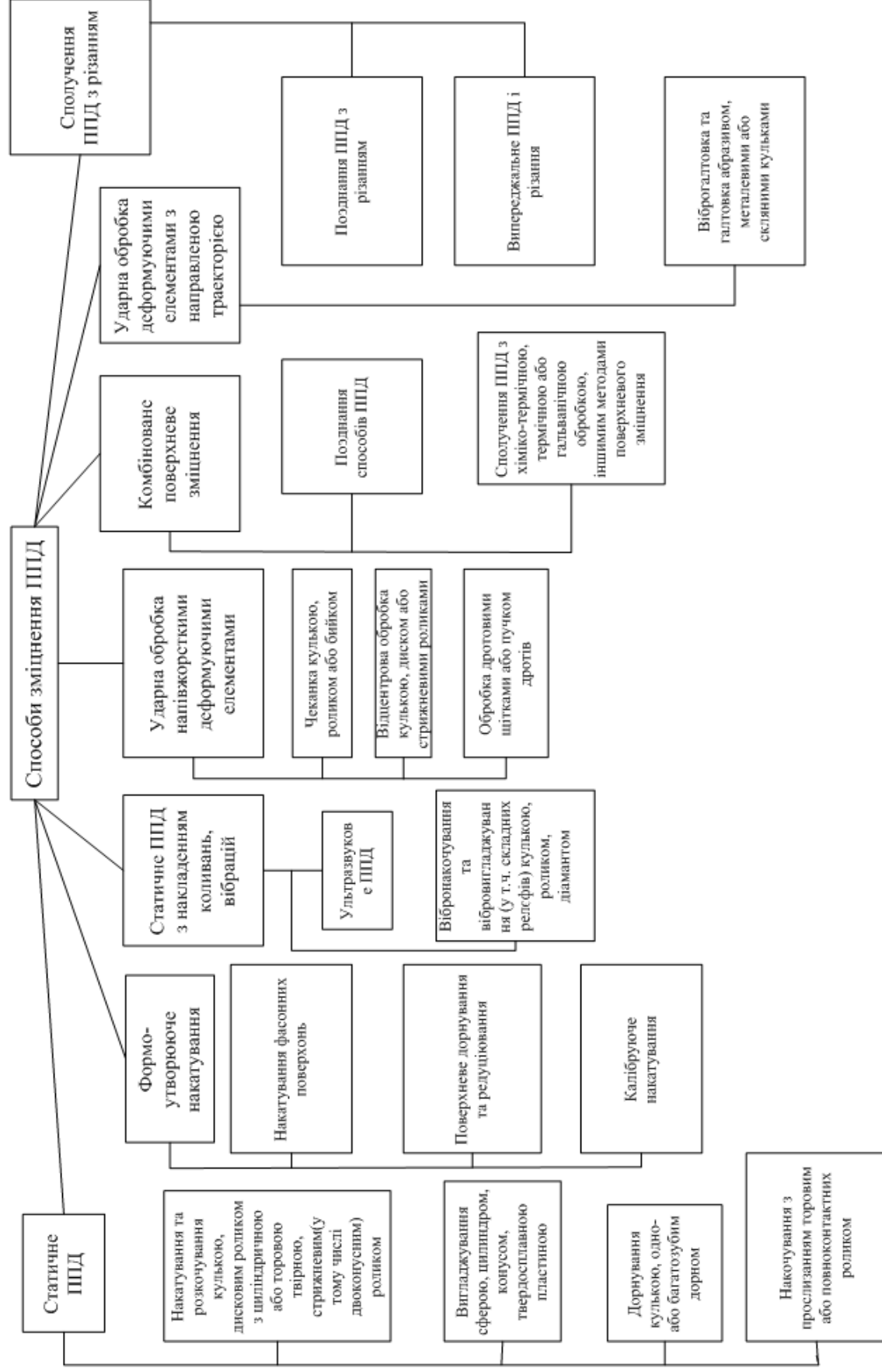


Рис.2.3. Класифікація способів зміцнення ППД [12]

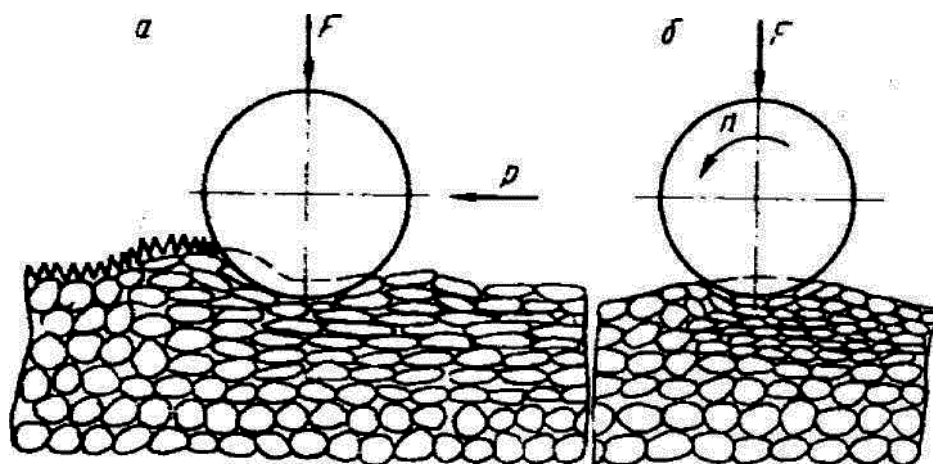


Рис.2.4. Схема пластичних деформувань у верхньому шарі деталі під час поверхнево-пластичної деформації: а – в повздовжньому перерізі; б – в поперечному перерізі

Поверхневий шар при обробці деталей ППД формується в результаті складних взаємозалежних явищ, що відбуваються в осередку деформування і зонах, які прилягають до нього, а саме: багаторазових пружних і пластичних деформацій, зміни міцності і пластичних властивостей деформованого металу, тертя і теплових процесів, зміни мікро- і макроструктури, мікрогеометрії самої поверхні та ін.

Обробка поверхневим пластичним деформуванням супроводжується складними структурними і фазовими перетвореннями, характерними для формування поверхневого шару. У початковий момент відбувається дроблення зерен металу на блоки (полігонізація) і утворюється мозаїчна структура. Далі, внаслідок посилення розвитку зрушень по площинах ковзання, утворюються нові, значно здрібнені зерна. При цьому кристаліти втрачають свою глобоїдну форму, сплющуються, витягаються в напрямку деформування. Різко змінюється співвідношення їхніх розмірів, утворюється впорядкована орієнтована структура волокнистого характеру з анізотропними механічними властивостями, коли пластичність уздовж волокон вище, ніж у поперечному напрямку.

Основною причиною зміцнення є лавиноподібний розвиток дислокацій - дефектів кристалічних ґрат металу, що накопичуються поблизу ліній зсувів, і наступне їх затримання перед різного роду перешкодами, що утворюються в процесі деформування (схрещення дислокацій, траєкторії руху яких перетинаються між собою під деяким кутом; смуги деформування та ін.) або існуючими до нього (міжкристалічні граничні шари, скупчення атомів домішок, елементи другої фази та ін.). Дроблення на блоки об'ємів металу, укладених між лініями ковзання, поворот цих блоків, скривлення площин ковзання і нагромадження на них продуктів руйнування кристалічних ґрат сприяють збільшенню нерівностей по площинах ковзання, а отже, і зміцненню.

Експлуатаційні властивості деталей машин багато в чому залежать від точності їхнього виготовлення і значною мірою визначаються якістю їх поверхні. Якість поверхні деталей машин визначається сукупністю характеристик шорсткості поверхні, фізико-механічного стану та мікроструктури металу поверхневого шару і залишкових напружень, які надані деталі під час її обробки.

При чистовій обробці чавунних деталей холодним пластичним деформуванням на якість обробленої поверхні впливають наступні фактори: вихідна шорсткість поверхні, що обробляється; зусилля розкочування; припуск і натяг; подача; швидкість обробки; кількість проходів інструмента; наявність та інтенсивність мащення поверхні, що обробляється.

Розробляючи технологічний процес обробки деталей, слід обирати спосіб ППО, форму і кількість обробляючих елементів в інструменті, а також технологічні умови поверхневої обробки.

На сучасному етапі розвитку ППД вибір умов обробки можна робити на основі приблизних розрахунків зусиль питомих тисків, результатів експериментальних досліджень матеріалів з подібними властивостями, універсальних і спеціальних номограм, попередніх спробних обробок.

Результати досліджень і накопичений виробничий досвід показали, що попередня шорсткість поверхні значно впливає на шорсткість обробленої поверхні, яка створюється після ППД.

Схема, яка ілюструє механізм деформування мікронерівностей, наводиться на рис. 2.5.

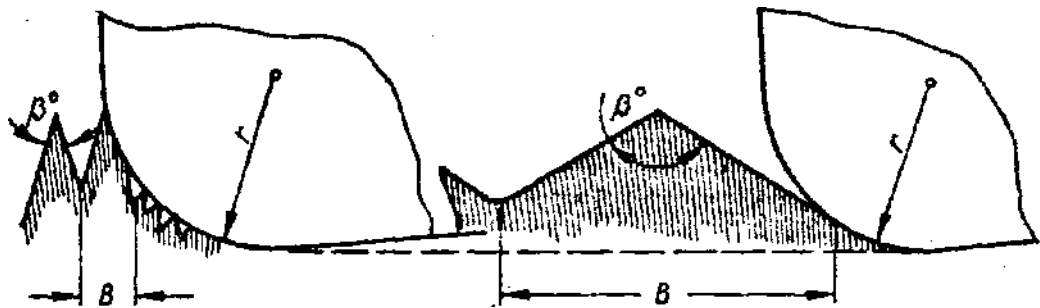


Рис.2.5. Схема деформування нерівностей поверхні [2]

При обробці холодним пластичним деформуванням між інструментом і поверхнею, що обробляється, створюється натяг, і деформуючі елементи тиснуть на поверхню з певною силою. Контакт між поверхнями деформуючих елементів і деталі відбувається по вершинах нерівностей. При виникненні напружень, які перевищують границю текучості, метал виступів нерівностей переміщується від місця контакту з деформуючим елементом. Внаслідок цього висота вихідних нерівностей R_a зменшується і утворюється поверхня з новими нерівностями.

Кут при вершині рівних по висоті вихідних нерівностей також впливає на величину шорсткості, отриману після обробки холодним пластичним деформуванням. При збільшенні кута при вершині нерівностей β отримана після обробки шорсткість поверхні зменшується. Це пояснюється таким чином. При одній і тій же висоті і малій ширині основи виступів B кожен виступ (мікрогребінець) у процесі обкатування роликом працює на згин (див. рис. 2.5). При збільшенні ширини основи виступів кожен гребінець починає працювати на стискання.

Як відомо, пластичні властивості чавуну виявляються більше при роботі на стискання, чим на згин. Отже, шорсткість попередньо обробленої поверхні з нерівностями, що мають більшу ширину основи, є більш сприятливою з точки зору подальшої обробки її холодним пластичним деформуванням.

Зі зменшенням вихідної шорсткості інтенсивність зменшення шорсткості обробленої поверхні помітно знижується, що пояснюється збільшенням опорної поверхні.

Аналіз методів ППД дозволив стверджувати про доцільність використання розкочування як ефективного методу обробки переривчастих отворів.

2.3. Розкочування як метод фінішної обробки отворів

При розкочуванні відбувається пластичне деформування поверхневого шару металу, що поширюється на деяку зону, розташовану під обробленою поверхнею. Стан поверхневого шару металу характеризується, зокрема, поверхневою твердістю, товщиною деформованого шару, а також мікроструктурою цього шару. Одним зі способів підвищення твердості поверхневих шарів є наклеп.

Незважаючи на те, що наклеп є тільки супутнім явищем при чистовій обробці отворів у чавунних деталях холодним пластичним деформуванням, його вплив на експлуатаційні властивості деталей машин великий.

Поверхневий наклеп виникає під дією контактного навантаження, при цьому відбувається місцева пластична деформація, неоднорідна в межах наклепаного шару. Інтенсивність деформації поверхневого шару є більш важливим фактором, що значною мірою характеризує фізичні властивості цього шару, визначає запас пластичності і ступінь зміцнення матеріалу.

Дані по збільшенню твердості поверхневих шарів чавуну в результаті чистової обробки холодним пластичним деформуванням показують, що

величина зміни твердості залежить від складу і структурного стану чавуну. Найбільш високий відносний приріст твердості відбувається при обробці сірого чавуну з феритною структурою, найменший - при обробці чавуну з мартенситною структурою.

Область промислового застосування методів чистової обробки металів холодним пластичним деформуванням невпинно поширюється. Тому, виникає необхідність у розробці рекомендацій з визначення оптимальних умов обробки, при яких забезпечується як висока продуктивність, так і висока точність.

Обробка отворів багатороліковими розкатками найчастіше застосовується як розмірно-чистова, мета якої полягає не тільки в зменшенні шорсткості або зміцненні поверхні, але й у виправленні її форми і підвищенні точності. При розмірно-чистовій обробці основною вимогою, що ставиться до інструменту, є забезпечення визначеної макро- і мікрогеометрії поверхні, що обробляється.

При обробці отворів холодним пластичним деформуванням зміна розмірів отворів досягається лише за рахунок пластичної деформації, тому отримані розміри отворів після обробки знаходяться в безпосередній залежності від розмірів отворів до обробки.

У зв'язку з цим, попередню обробку слід робити з точністю, яка відповідає вимогам точності готового отвору.

Таким чином, можна зробити висновок:

- точність отвору після ППД в значній мірі визначається точністю попередньої операції;
- твердість, яка виникає після ППД, в основному, залежить від структури чавуну (перлітна чи феритно-перлітна);
- основним параметром якості поверхні, який значно залежить від режимів ППД, є шорсткість.

Розглянемо основні параметри розкочування.

Зусилля розкочування. Силове поле, що виникає при обробці холодним пластичним деформуванням, характеризується величинами радіальної сили P_r , осьової сили P_{oc} і крутного моменту $M_{кр}$.

Зусилля розкочування впливають на шорсткість, що утворюється при обробці поверхні, ступінь і глибину наклепу, а також і на величину напружень, що виникають у поверхневому шарі металу.

Аналіз дослідних даних показав, що величина радіального зусилля, осьової сили і крутного моменту тим вище, чим менш пластичний оброблюваний матеріал. Установлено, що зі збільшенням радіального зусилля шорсткість обробленої поверхні знижується до певного значення, що відповідає критичному зусиллю, яке залежить від мікроструктури чавуна.

Перевищення значень критичних зусиль розкочування, веде до відшаровування часток металу і до збільшення шорсткості поверхні.

Натяг. Натяг є одним з основних параметрів режиму обробки, тому що від нього залежить величина тиску на деформуючі елементи. При цьому повинна виконуватися наступна умова: величина тиску повинна бути мінімальною, при якій досягаються якісні показники процесу.

Подача. Подача є одним з параметрів режиму обробки холодним пластичним деформуванням, що впливають на шорсткість поверхні.

Зі зменшенням подачі шорсткість поверхні зменшується до визначеного значення. При надмірно малих подачах відбувається лущення і різке збільшення шорсткості поверхні, зв'язане з утомними явищами в поверхневому шарі металу. Це пояснюється тим, що при малих подачах кратність прикладання навантаження на одиницю площі значно більше, ніж при великих подачах.

В усіх випадках величина подачі повинна бути меншою ширини відбитків ролика на поверхні, що обробляється. У протилежному випадку, на поверхні залишаться неопрацьовані ділянки. Проте, щоб уникнути збільшення кратності прикладання навантаження, подача не повинна бути набагато меншою за ширину відбитку. Величина подачі за інших рівних умов

залежить також і від структури чавуну. Зі збільшенням вмісту перліту в структурі чавуну величина подачі для одержання однієї і тієї ж шорсткості повинна зменшуватися.

Швидкість обробки. При збільшенні швидкості обробки шорсткість поверхні незначно збільшується, тому що зі збільшенням швидкості обробки інерція поширення пластичної деформації зменшується.

З ростом швидкості обробки час прикладення навантаження зменшується, одночасно може збільшуватися пружна фаза деформації. Ріст пластичної деформації трохи відстає від росту швидкості прикладення навантаження. Отже, при низьких швидкостях пластичне деформування вихідної шорсткості відбувається повніше, ніж при високих швидкостях. Однак збільшення швидкості обробки в цілому впливає на збільшення шорсткості - у межах одного-двох розрядів. Тому, швидкість обробки слід вибирати, виходячи з умови максимальної продуктивності з урахуванням жорсткості системи ВПД (верстат – пристрій – інструмент – деталь).

Змащення поверхні, що обробляється. При розкочуванні роль змащення з погляду отримання меншої шорсткості поверхні незначна. Тільки при використанні в якості мастильно-охолодної рідини гасу з добавками стеаринової кислоти і двосірчастого молібдену трохи знижується остаточна шорсткість поверхні в порівнянні з обробкою «всуху». Так як вплив змащення на зменшення шорсткості поверхні незначний, чистову обробку чавунних деталей холодним пластичним деформуванням рекомендується вести без змащення («всуху»).

Кількість проходів інструменту. При збільшенні числа проходів інструменту збільшується кратність прикладення навантаження і різко знижується продуктивність обробки. Зміна шорсткості поверхні чавунних деталей при другому і наступних проходах настільки незначна, що з погляду підвищення продуктивності праці економічно доцільно обробку вести за один прохід.

2.4. Обладнання та інструмент при розкочуванні

2.4.1 Аналіз конструктивних рішень роликового інструменту

Роликовий інструмент, в основному головки з жорстким притиском, найбільш поширені в технології обробки внутрішніх циліндричних отворів. Його застосовують у вигляді спеціального оснащення універсальних токарних верстатів в обробних лініях і центрах з магазинами інструментів. Приклад роликових головок, що виготовляються серійно з конусним і циліндричним хвостовиками для кріплення, приведений на рис.2.6.

Дослідження [1] показали, що при розкочуванні роликом реалізується контактово-зсувна схема деформації, при якій у процесі обробки чавуну (матеріалу малопластичного в звичайних умовах) створюється такий напружений стан, при якому відбувається найбільш інтенсивне пластичне деформування.

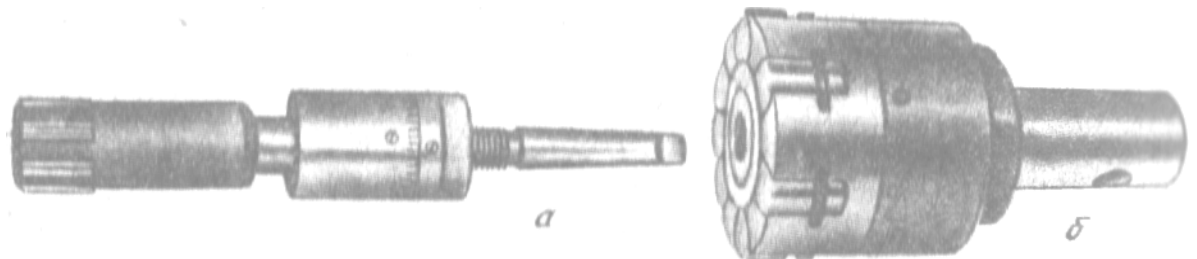


Рис.2.6. Роликова головка для ППО отворів типу RM2 з конічним хвостовиком (для наскрізних отворів) (а) і типу S2 (б) з циліндричним хвостовиком (для глухих отворів діаметром 32-140 мм).

Головка (рис.2.6, а) має довгі циліндричні ролики і призначена для обробки наскрізних отворів, у той час як головка, приведена на рис. 2.6, б має ролики із шейками і може бути використана також для обробки глухих отворів.

У конструкції роликових головок найчастіше застосовують конічні ролики: спеціальні або нормальні (підшипникові), які взаємодіють з конічними кільцевими доріжками кочення. Система двох конусів полегшує регулювання настановного розміру головки.

Головка (див. рис. 2.6, а) призначена для обробки отворів $\varnothing$ 35-50 мм і глибиною до 40 мм. Змінюючи внутрішнє кільце, а також втулку, можна перестроїти головку на діаметр іншого розміру в межах 35-50 мм. Межі регулювання головки за допомогою гайки сягають 1 мм. Обертова втулка з роликами розташовується в підшипнику ковзання і опорному підшипнику кочення, до якого вона притискається пружиною. Пружина стискається при виведенні головки з отвору (наприклад, коли головка робить обертальний рух і не використовується важіль), унаслідок чого ролики можуть переміщуватися під впливом сил тертя (ролик - деталь) до ділянки доріжки кочення з меншим діаметром. Після видалення головки з отвору пружина зрушує втулку разом з роликами уздовж внутрішнього кільця в робоче положення, що відповідає встановленому розмірові. Головку можна також експлуатувати на універсальних токарних верстатах, де її закріплюють у втулці задньої бабки, а також на свердлильних верстатах (закріплення в патроні).

Головка (див. рис. 2.6, б) призначена для обробки отворів у деталях, що роблять під час обробки обертальний рух на універсальних токарних і револьверних верстатах. Довжина отворів, що піддаються обробці, може досягати 150 мм, а їхній діаметр - 70 мм. Змінюючи сепаратор разом з роликами, можна також обробляти отвори діаметром до 110 мм. Підведення усередину мастильно-охолодного середовища через сердечник головки хвостовиком дуже корисний для обробки отворів глибиною > 50 мм. Рідина вимиває залишки стружки й інші забруднення з зони обробки. У випадку обробки на токарному верстаті потрібні додаткове оснащення і прокладки в патроні для попередження витікання рідини через шпиндель.

Роликові головки можна також застосовувати в технології виготовлення циліндрів для обробки отворів $\varnothing$ 25-100 мм, що раніше розточували спеціальними головками із широкими різцями, наприклад фірми «Madison». Розточувальні головки, а також головки для поверхнево-пластичної обробки (ППО) монтують на робочих шпинделях

горизонтальних свердлильних верстатів для глибокого свердлення. Циліндри, що виготовляються на таких установках, обробляють за три технологічні операції: попереднє розточення, остаточне чистове розточення спеціальними головками з направляючими вкладишами і ППО роликовою головкою.

Універсальні роликові головки для отворів серійно виробляються декількома закордонними фірмами. Самими популярними є головки типу R (від R1 до R6) фірми «Hegenscheidt». Головки цього типу дозволяють робити обробку отворів діаметром 5-380 мм. Глибина обробки отворів головками R1 - R5 (з конічними захопленнями Морзе № 2 - № 5) досягає 53 - 200 мм.

Подібними по конструкції і застосуванню є роликові головки, вироблені фірмою «Kotsch» (заводи «Hegenscheidt»), а також «Madison Industries» GmbH (тип Мікроллер MD або MS), діаметром 4,7 - 400 мм, а також мінімікроллер для отворів діаметром 2 - 4,6 мм і глибиною 30 - 40 мм.

Американська фірма «The Gustav Wiedeke Company» пропонує 26 типових розмірів роликових головок для обробки отворів діаметром 6,5 - 200 мм і глибиною 50 -120 мм. Головки подібного розміру виробляються також американською фірмою «Cogsdill Tool Products» (для отворів діаметром 4,7 - 50 мм і довжиною до 300 мм), а також англійською фірмою «G. Alexander Machinery» (з межами діаметрів 12 -50 мм і глибиною отворів до 133 мм).

2.4.2 Аналіз конструкцій комбінованих інструментів

До основних переваг комбінованих інструментів слід віднести: висока продуктивність (суміщення процесів різання і поверхневого пластичного деформування дозволяє підвищити продуктивність у два-три разів); високий ступінь чистоти оброблених поверхонь (при сполученій обробці різанням і поверхневим пластичним деформуванням шорсткість поверхні, обробленої комбінованим інструментом, досягає $R_a = 0,16 \div 0,63$ мкм); висока точність геометричних форм і розмірів оброблених поверхонь (точність обробки комбінованим інструментом досягає 5- 6 квалітету).

Комбінований інструмент являє собою поєднання двох інструментів: ріжучого і деформуючого.

За видом поєднання ріжучих і деформуючих елементів комбіновані інструменти розділяються на: жорсткі, коли деформуючі елементи жорстко з'єднані з корпусом ріжучого інструмента; пружні, коли деформуючі елементи підпружинені щодо корпусу ріжучого інструмента; шарнірні, коли деформуючі елементи мають можливість деякої вільності переміщення щодо ріжучого елемента.

Комбіновані інструменти жорсткої конструкції застосовуються для розмірно-чистої обробки, коли поряд з високою чистотою потрібна висока точність форми і розмірів поверхонь. Комбіновані інструменти пружної дії і шарнірної конструкції в основному служать для одержання високого класу чистоти поверхні.

Найпростішою схемою такого інструмента для сумісної обробки є з'єднання звичайного різця з кульковим або роликовим деформуючим елементом (елементарна нижча пара). При цьому, як зазначалося вище, деформуючий елемент може бути зв'язаний з ріжучим жорстко або пружно. Подальшим розвитком елементарної нижчої пари комбінованих інструментів є створення багатоелементних комбінованих інструментів. Деформуючі елементи в цих інструментах можуть розташовуватися у вставках і в сепараторах. Використання сепараторних інструментів є кращим, тому що в цьому випадку можна розмістити більшу кількість деформуючих елементів, що дозволяє підвищити продуктивність обробки. Крім того, при обробці переривчастих поверхонь розміщення деформуючих елементів у сепараторі забезпечує плавність роботи інструменту.

У комбінованих інструментах з елементарною нижчою парою ріжучі елементи взаємодіють з поверхнею обробки і стружкою, що збігає, з великим тертям ковзання, а деформуючі елементи працюють в умовах тертя кочення. У результаті цього стійкість деформуючих елементів у десятки і сотні разів вище стійкості ріжучих елементів, що не дозволяє одержувати оброблені

поверхні з однорідною шорсткістю по всій площі обробки (особливо це відноситься до обробки поверхонь великої довжини).

Розкочування поверхонь проводиться з оптимальною величиною натягу, що забезпечує найменшу шорсткість обробленої поверхні. Зменшення або збільшення натягу проти оптимального приводить до збільшення шорсткості поверхні. Поступовий знос ріжучих елементів змінює величину натягу для деформуючих елементів, що погіршує чистоту обробки. Крім того, унаслідок зносу ріжучих елементів інструменту буде порушуватися геометрична форма обробленої під розкочування поверхні, а, виходить, і розкатана поверхня буде мати відповідну погрішність форми. Це пов'язано з тим, що деформуючі елементи з пружним зв'язком копіюють погрішності форми, отримані при обробці поверхні ріжучим елементом, а деформуючі елементи з жорстким зв'язком незначно виправляють ці погрішності.

При сумісній обробці поверхонь різанням і поверхневим пластичним деформуванням комбінованими інструментами, виконаними з елементарною нижчою парою, збігаючи з ріжучого елемента стружка може попадати під деформуючий елемент, що неприпустимо при чистовій і фінішній обробці.

Таким чином, при проектуванні комбінованих інструментів необхідно прагнути до зрівнювання стійкостей ріжучих і деформуючих елементів. З цією метою слід як ріжучі елементи застосовувати інструменти з ріжучою кромкою, що переміщується в процесі обробки.

Комбіновані інструменти з елементарною нижчою парою слід проектувати для обробки деталей з невеликою площею поверхні. При цьому одноеlementні інструменти можна використовувати для обробки циліндричних поверхонь жорстких деталей або при жорсткому кріпленні інструмента, тому що значні однобічні зусилля можуть привести до таких віджимань деталі або інструмента, що викликають погрішності геометричної форми обробленої поверхні, які перевищують установлені технічними умовами.

Багатоелементні прості і сепараторні комбіновані інструменти слід використовувати при обробці циліндричних поверхонь нежорстких деталей або при великому консольному вильоті інструмента. У цьому випадку деформуючі елементи, граючи роль рухливого люнета, значно підвищують твердість технологічної системи і точність обробки.

Комбіновані інструменти, призначені для поєднання процесів різання і поверхневого пластичного деформування при обробці циліндричних отворів, мають різні схеми виконання з використанням елементарної нижчої пари. Вони виконуються одне - і багатоелементними, сепараторними простими і сепараторними планетарними. По виду зв'язку ріжучих і деформуючих елементів вони можуть бути з жорстким або пружним зв'язком, а по ступені зрівноважування сил різання і зусиль деформування розділяються на зрівноважені і незрівноважені, причому незрівноважені, як правило, бувають інструментами однобічної дії.

Як деформуючі елементи комбіновані інструменти для обробки отворів мають більшу різноманітність, ніж інструменти для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь. У них застосовуються алмазні вирівнювачі, кульки, ролики дискові, циліндричні, конічні, комбіновані, торові та ін., знаходять застосування також і повноконтактні ролики.

Характерною для цих інструментів є більша розмаїтість ріжучих елементів. Як ріжучі елементи, крім призматичних різців, використовуються зенкера, розвертки, плаваючі пластини, протяжки тощо.

При проектуванні конструкцій комбінованих інструментів, призначених для поєднаної обробки отворів різанням і поверхневим пластичним деформуванням, до інструменту ставиться ряд вимог, від успішного вирішення яких залежить працездатність інструменту:

- обмеження габаритних розмірів інструменту, тому що інструмент призначається для обробки отвору визначеного діаметра;
- необхідність надійного відводу тепла з зони обробки. Утруднений тепловідвід вимагає створення спеціального пристрою для підведення

мастильно-охолодної рідини у зони роботи ріжучих і деформуючих елементів;

- забезпечення надійного видалення стружки з зони обробки: дроблення і створення пристроїв для її транспортуванні і зберігання деформуючих елементів від улучення на них часток стружки;

- необхідність повернення інструмента через оброблений отвір (при зворотному ході інструмента) вимагає створення механізму скидання ріжучих і деформуючих елементів задля уникнення псування обробленої поверхні;

- при обробці глибоких отворів необхідні додаткові опори інструмента і достатня його жорсткість.

2.5. Висновки по розділу 2

За результатами літературного огляду за темою досліджень зроблені наступні висновки:

1. Порівняльне оцінювання технологічних способів фінішної обробки поверхонь, з точки зору трибологічних характеристик, енерговитрат та вартості операції вказує на ефективність використання способів ППД.

2. Аналіз методів ППД дозволив стверджувати про доцільність використовування розкочування як ефективного методу обробки переривчастих отворів.

3. Аналіз конструкції інструментів для розкочування дозволив встановити вимоги щодо оцінки їх роботи: можливість одержання високого класу чистоти поверхні й геометричної форми отвору, передбачених технічними умовами. При цьому при виборі схеми робочого руху інструменту потрібно також врахувати конструкцію та розміри отворів у корпусах розподільника.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Розробка конструкції інструменту для обробки переривчастих отворів

Для ремонту отворів чавунних корпусів нами було спроектовано інструмент, який дозволяє обробити переривчасту поверхню, не пошкоджуючи відсічних крайок поясків отвору (рис.3.1 - 3.2).

Критерієм оцінки роботи інструменту є можливість одержання високого класу чистоти поверхні й геометричної форми отвору, передбачених технічними умовами й не нижче чим після притирання, а саме:

1. Шорсткість поверхні не гірша за $R_a 0,32$ мкм,
2. Овальність не більше 6 мкм ,
3. Конусність не більше 6 мкм,
4. Бочкоподібність або сідлоподібність не більші за 6 мкм.

Інструмент для обробки переривчастих отворів представляє собою 6 довгих роликів (діаметр роликів 6 мм) конічної форми, установлених у сепараторі на конусі оправки. Довжина роликів - 80 мм і обрана такою, щоб перекрити всю довжину отвору в корпусі гідророзподільника.

Кути конусів роликів і оправлення розраховані такими, що твірні роликів у зібраному інструменті розташовуються по циліндричній поверхні.

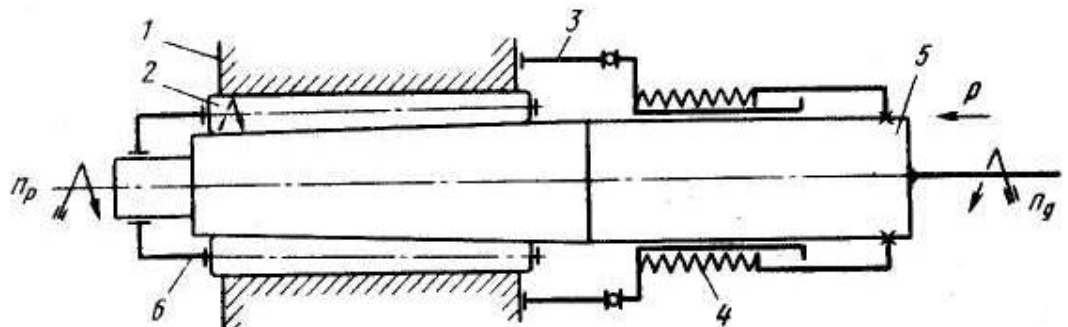


Рис.3.1. Принципова схема роботи інструменту для обробки переривчастих отворів: 1 – деталь; 2 – ролик; 3 – опорна втулка; 4 – пружина; 5 – конусна оправка; 6 - сепаратор

Сепаратор 6 встановлюється на упорному шарикопідшипнику 14 у корпусі 5 (рис.3.2). До сепаратора 6 штифтами 15 жорстко кріпиться втулка 11. Закривається весь регулювальний механізм кришкою 9, яка кріпиться до корпусу 5 гвинтами 12.

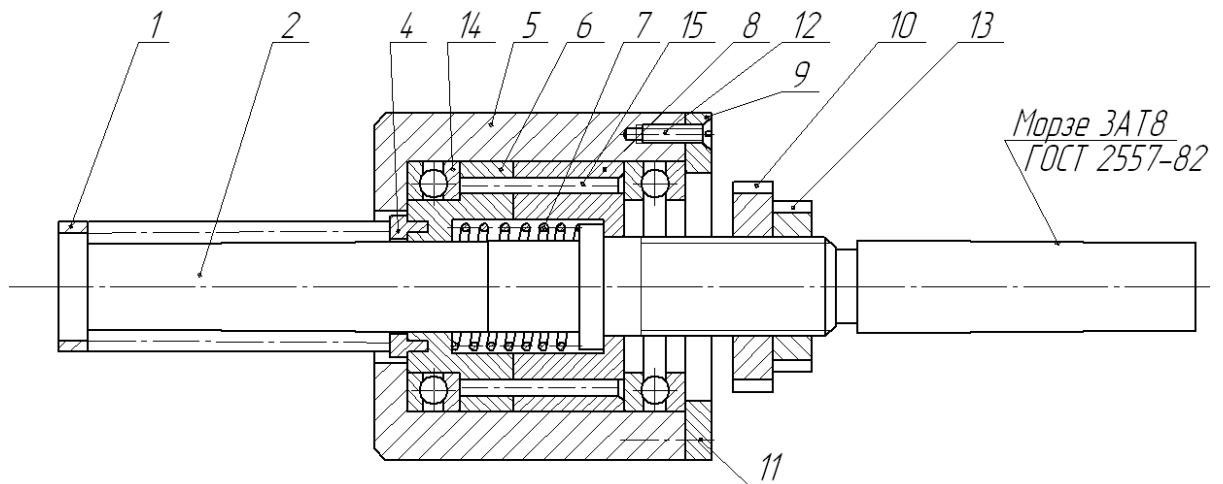


Рис.3.2. Конструкція інструменту для обробки переривчастих отворів: 1 – стакан; 2 – стрижень; 3 – ролик; 4 – упор; 5 – корпус; 6 - сепаратор; 7 – пружина; 8 – втулка; 9 – кришка; 10 – гайка регулювальна; 11, 12 – гвинт; 13 – гайка; 14 – підшипник; 15 – штифт.

Регулювання діаметрального розміру здійснюється положенням гайки 10 і контргайки 13 на стрижні 2.

Вихідна поверхня отворів під обробку – поверхня отримана після чистового розточення із чистотою 1,2 мкм.

Інструмент для обробки переривчастих отворів працює наступним чином (рис.3.2). За один оберт гайки 10 ролики 3 розсуваються по діаметру на 0,05 мм. Встановлюється такий інструмент на вертикально-свердлильному верстаті з невеликою подачею шпинделя. На початковій фазі обробки інструмент встановлений на розмір менший діаметру отвору. Передня частина інструменту вводиться на всю глибину в отвір до зіткнення корпусу

5 з торцевою поверхнею деталі. При цьому стрижень 2 продовжує свій рух і, таким чином розсуває ролики 3 в радіальному напрямі до досягнення розміру, встановленого за допомогою гайок. Поперечне переміщення при поверхневій пластичній обробці, а тим самим і притиск роликів 3, установлених у сепараторі 6, до оброблюваної поверхні триває доти, поки пружина 7 повністю не буде стиснута буртиком стрижню 2. Під час виведення інструменту з отвору пружина 7 розтискається, це сприяє виходу ділянки з доріжкою кочення із зачеплення з роликами 3 й до зменшення розмірів інструменту, що дозволяє витягнути його вільно з отвору.

Особливість роботи цим інструментом у тім, що довгий ролик працює всієї твірної по всій довжині отвору. Від точності розташування цих роликів залежить точність отвору, зокрема конусність.

Друга особливість роботи інструментом у тім, що розведення роликів до крайнього розрахункового положення здійснюється конусом шпинделя при ручній подачі, тому що при механічній навіть найменшій (0,133 мм/об) неможливо вловити момент закінчення подачі й відбувається її самовимикання від запобіжного механізму. Розсовування роликів конусом шпинделя на величину натягу 0,1 мм по діаметрі відбувається при переміщенні шпинделя у вертикальному напрямку всього на 2 мм (кут конуса шпинделя 3°). Це переміщення здійснюється навіть при найменшому числі оборотів шпинделя на верстаті 2A135 - 68 об/хв за 12 сек.

При більших обертах час розведення роликів буде меншим і визначити момент закінчення розведення дуже важко.

Точність розміру по діаметрі після розкочування залежать від точності попередньої обробки. Деформація (збільшення) отвору при натягу 0,1 мм по діаметрі становить 20-25 мкм.

Інструмент найкраще застосовувати на свердлильних верстатах, що мають малі подачі (до 0,05-0,08 мм/об). У цьому випадку можливо застосовувати механічну подачу.

Продуктивність обробки інструментом висока. Машинний час розкочування становить 12-15 сек. Штучний час обробки із застосуванням простого пристосування складе не більше 0,5 хв.

Попередній розрахунок дав можливість виготовити інструмент в металі (рис.3.3), який дозволяє обробити переривчасту поверхню, не пошкоджуючи при цьому відсічних крайок поясків отвору. Інструмент, робоча зона установки для обробки переривчастих отворів ППД та пристосування для закріплення корпусів на верстаті наведені на рис.3.3 - 3.5.

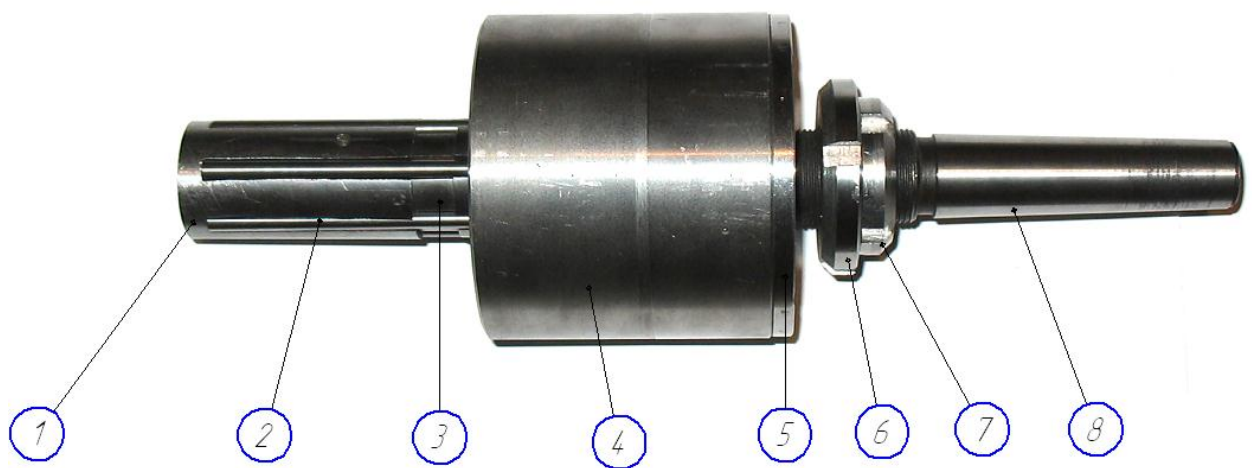


Рис.3.3. Загальний вигляд інструменту для обробки переривчастих отворів поверхневим пластичним деформуванням (діапазон діаметрів поверхонь, що обробляються, 34,3 ...34,6 мм): 1 – стакан; 2 – ролик; 3 – сепаратор; 4 – корпус ; 5 – кришка; 6 - гайка регулювальна; 7 – гайка стопорна; 8 – стрижень



Рис.3.4. Робоча зона пристрою для обробки переривчастих отворів чавунних корпусів поверхневим пластичним деформуванням



Рис.3.5. Кондуктор для встановлення корпусів при обробці на вертикально-свердлильному верстаті

3.2. Експериментальні дослідження використання ППД при відновленні корпусів ГРК

3.2.1 Дослідження мікрогеометрії поверхні отвору корпусу після розкочування

Методика досліджень. Дослідження мікрогеометричних характеристик зразків здійснювалося профілографуванням поверхні на профілографі-профілометрі «Talysurf-4» англійської фірми «Taylor-Hobson» та кругломірі Talygon-373 (рис.3.6-3.7). Для дослідження виготовлялися шліфи з поверхонь отворів. Обробку профілограм та обчислення характеристик шорсткості поверхні здійснюється відповідно ГОСТ 2789-73.



Рис.3.6. Профілограф - профілометр «Talysurf-4»



Рис.3.7. Кругломір «Talysond – 373»

Результати досліджень. При дослідженні проводилося порівняння поверхні, отриманих розкочуванням з поверхнею після притирання.

На рис.3.8 представлена топографія поверхні після притирання. Характер штрихів та їх напрямки аналогічні хонінговано поверхні. Ця поверхня являє собою чергування пересічних у двох напрямках подряпин різної глибини. На профілограмі (рис.3.9) представлена та ж поверхня, на якій можна побачити нерегулярні виступи й западини різної висоти. Висота нерівності відповідає 10 класу чистоти поверхні.

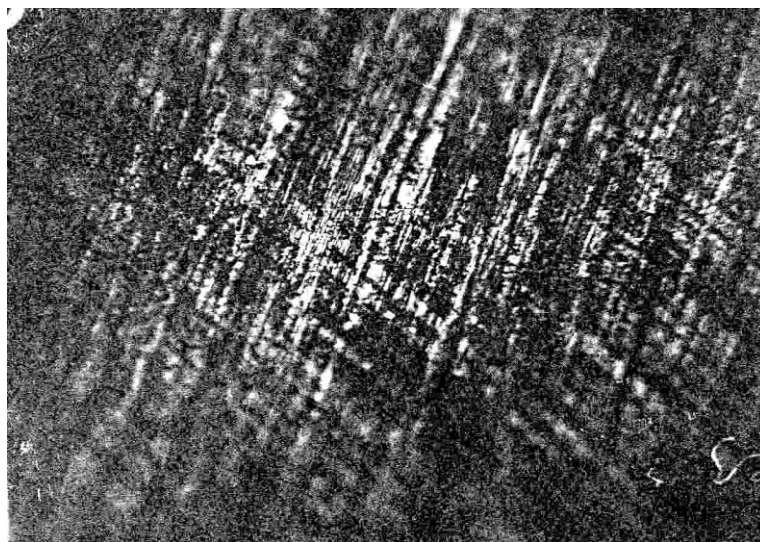


Рис.3.8. Топографія поверхні після притирання, $\times 300$

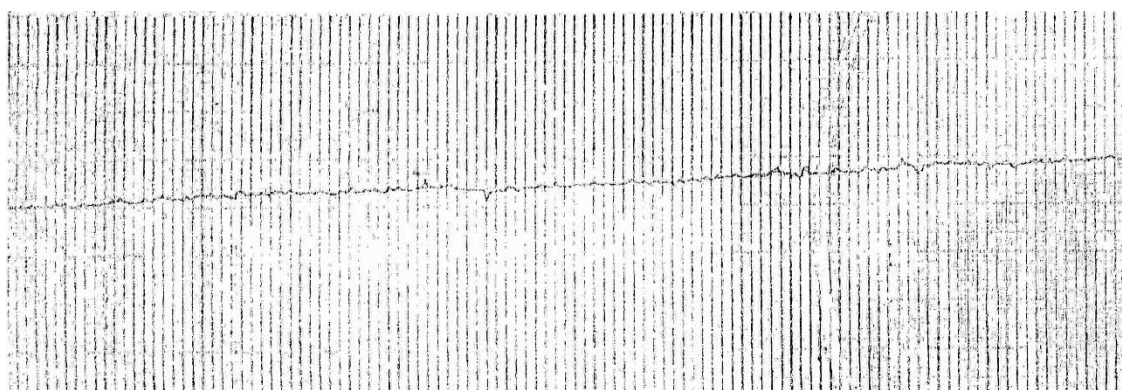


Рис.3.9. Профілограма поверхні після притирання, $\times 4000$

На топографії поверхні після розкочування (рис.3.10) видно, що поверхня складається зі світлих відносно рівних ділянок, що займають приблизно 75 - 80% від всієї поверхні й темних ділянок, які розташовані окремими зонами.



Рис.3.10. Топографія поверхні після розкочування, $\times 300$

Можна припустити, що в процесі розкочування гребінці на поверхні, що залишилися після чистового розточення, деформуються настільки сильно, що відбувається руйнування металу. Структура поверхні представляє суміш фериту й перліту, розділеного графітом на окремі зерна. У місці руйнування зерна утворюється мікрорельєф із глибокими западинами, представленими темними ділянками, які розташовані на виступах вихідної поверхні (рис.3.10).

На рис.3.11 представлена профілограма поверхні після розкочування. Представлена поверхня складається з відносно рівних ділянок з глибокими впадинами. Шорсткість поверхні відповідає 9 класу чистоти.

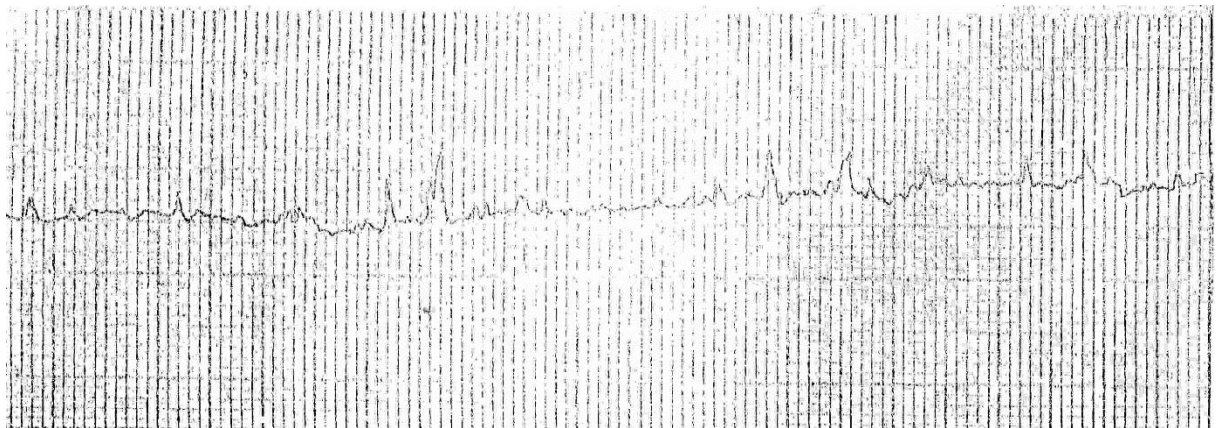


Рис. 3.11. Профілограма поверхні після розкочування, $\times 4000$

Значної зміни структури чавуну в процесі розкочування не спостерігається ні на розкатаній поверхні, ні в глибині по ній (рис.3.12).



Рис.3.12. Мікроструктура поверхні після розкочування, $\times 1200$

3.2.2 Дослідження твердості поверхневого шару

Методика досліджень. Дослідження твердості розкатаного шару в отворі проводиться приладом ПМТ-3 (рис.3.13). В якості зразків застосовуються ті ж самі шліфи, на яких помітні графітові включення.



Рис.3.13. Прилад ПМТ-3 для вимірювання твердості

Оптимальним навантаженням за серією попередніх дослідів було обрано навантаження на алмазній піраміді приладу 20 г. При більших навантаженнях відбитки часто потрапляють в графітові включення. При менших навантаженнях виникає більший відносний розкид розмірів діагоналей відбитків. При усіх перевірках твердості уколи алмазної піраміди виконувались у біле поле на шліфу (суміш перліту та фериту) по можливості далі від графітових включень.

Для того, щоб виключити помилки у показаннях приладів і підрахунках розмірів діагоналей відбитків, які виходять внаслідок неоднакової твердості зерен чавуну, проводиться серія уколів (40 уколів) та для розрахунків твердості приймається середнє арифметичне значення діагоналі відбитка.

Для того, щоб усі уколи кожної серії знаходилися на визначеній відстані від краю поверхні зразок (шліф) встановлюють так, щоб лінія розділу була паралельною одній зі сторін приладного столика мікроскопу. Перехід від одного уколу до іншого проводиться переміщенням зразка в напрямку, паралельному лінії розділу на шліфі. Невеликі за розміром відбитки уколів дають можливість провести заміри твердості безпосередньо поблизу поверхні.

Перша серія уколів виконувалась на відстані 0,05 мм від поверхні. В цій розмір включається і зона зруйнованого металу шириною 0,005-0,025 мм. Інші серії уколів виконували на таких відстанях від розкатоної поверхні: 0,1 мм; 0,25 мм; 0,5мм; 0,75 мм; 1 мм; 1,25 мм; 1,5 мм;; 1,75 мм та 2,5 мм.

Результати досліджень. Результати замірів твердості наводяться в табл.3.1. Залежність мікротвердості матеріалу від відстані від поверхні після розкочування наведена на рис.3.14. Бачимо, що поверхневий шар товщиною до 0,05 мм (а найбільш вірогідно 0,02 - 0,025 мм – темна смуга на фотографії) дуже сильно деформовано, має високу твердість. Потім слідує зона підвищеної твердості чавуну шириною до 1,5 мм. Твердість в цій зоні не залишається постійною. Вона тим більша, чим ближча до поверхні. Тут твердість вища у порівнянні з твердістю основного металу на 14,5 %.

Таблиця 3.1 – Вимірювання мікротвердості в залежності від відстані від розкатоної поверхні

Відстань від поверхні, мм	0	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50	1,75	2,50
Мікротвердість, кг/мм ²	409,6	325,2	325,2	322,0	319,0	312,4	306	301,2	286,8	283	284,5

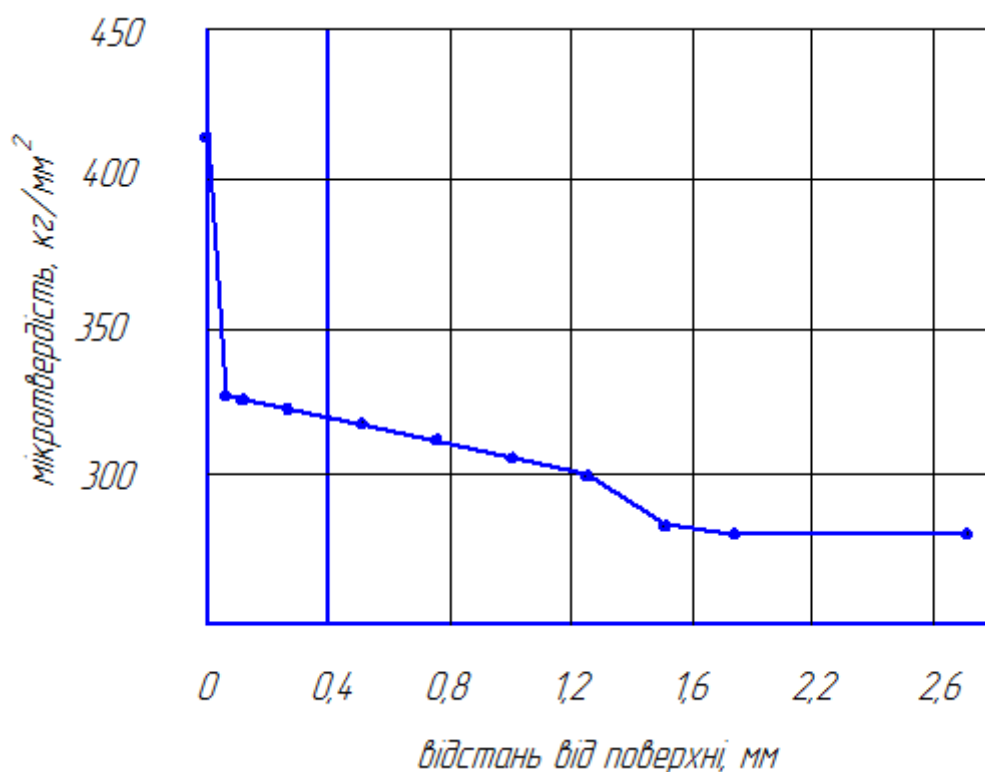


Рис. 3.14. Зміна мікротвердості поверхневого шару чавуну СЧ 21-40 після розкочування

3.2.3 Дослідження залишкової деформації

Методика досліджень. З метою визначення деформації отворів залежно від натягу при розкочуванні були проведені спеціальні дослідження. При цих дослідженнях проводилося розкочування отворів у тих самих корпусах з послідовним збільшенням натягу від 0,05 мм до 0,15 мм по діаметру. Натяги були обрані наступні: 0,05 мм; 0,08 мм; 0,11 мм; 0,15 мм.

Після розкочування отвори замірялися по всіх чотирьох пасках у двох взаємно перпендикулярних перетинах. Паски пронумеровані так, як показано на рис. 3.15. Паски 1 і 4 мають ширину 6,5 мм, а паски 2 і 3 - 21 мм.

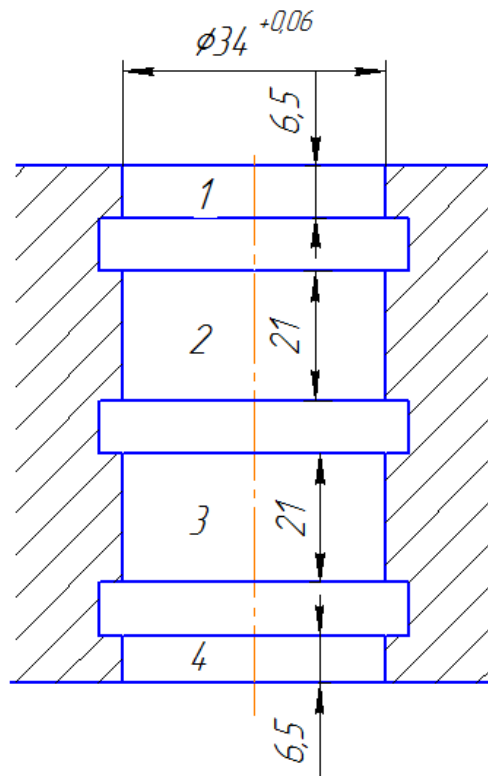


Рис.3.15. Розміри отвору в корпусі ГРК

Результати досліджень. На рис.3.16 представлений графік зміни діаметра отворів пасків залежно від натягу. На графіку дані деформації як середні значення по 3 корпусам.

Можна побачити, що при збільшенні натягу при розкочуванні до 0,08 мм відбувається збільшення залишкової деформації прямо пропорційно натягу по всім чотирьох пасках. Причому, збільшення діаметра отвору відбувається по всіх пасках на ту саму величину.

При збільшенні натягу до 0,15 мм деформація пасків 1 і 4 збільшується проти пасків 2 і 3. При цьому діаметри пасків 1 і 4 більше проти діаметрів пасків 2 і 3 на 0,01 – 0,012 мм. Таке велике відхилення в розмірах діаметрів викликає корсетність отвору, що перевищує допуск на конусоподібність за технічними умовами (допускається 0,006 мм).

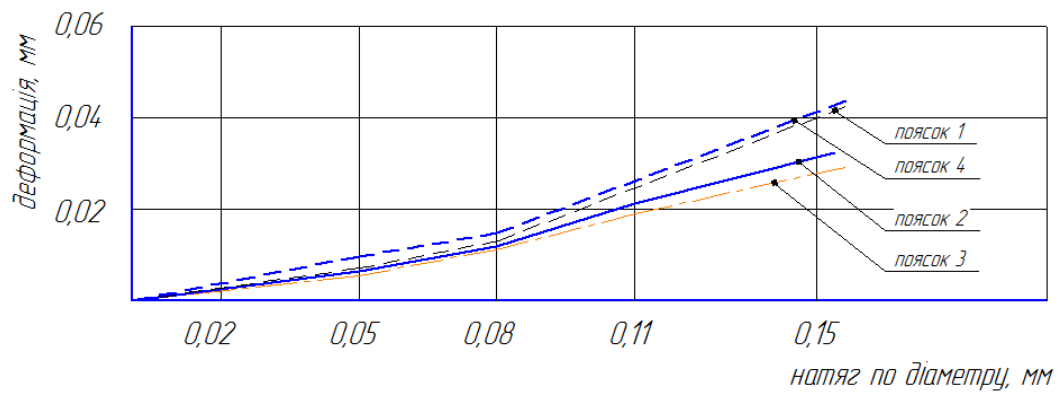


Рис. 3.16. Зміна діаметру пасків в залежності від натягу при розкочуванні

Аналіз рис. 3.16 дозволяє стверджувати, що одержання отворів в межах допуску можна при розкочуванні тільки на натягах, що не перевищують 0,1 мм.

Причину різної залишкової деформації по пасках можна пояснити тим, що метал при розкочуванні перетерплює як пружну, так і пластичну деформацію. У результаті пластичної деформації паски розширюються, тобто метал тече в осьовому напрямку. На вузьких пасках вплив металу в осьовому напрямку відбувається повільніше, ніж на широкі (менша гальмуюча дія на пластичну деформацію з боку основного металу).

3.2.4 Дослідження напружено-деформованого стану корпусу

Методика досліджень. Дослідження напружено-деформованого стану корпусу ГРК виконувалося за допомогою системи тривимірного твердотельного моделювання *SolidWorks* [16, 17].

Результати досліджень. На рис. представлені результати розрахунків, які виконані на ПЕОМ з використанням пакету програми *SolidWorks*. Нами за допомогою програми *SolidWorks* виконані дослідження напружено-деформованого стану корпусу ГПРК після операції розкочування. Отримані епюри (рис.3.17) дозволили заключити, що найбільші зони деформації спостерігаються в крайках отвору. Із цього робимо висновок, що при виборі

режимів розкочування, необхідно вибрати мінімальний натяг, який дозволяє досягти необхідну точність і шорсткість.

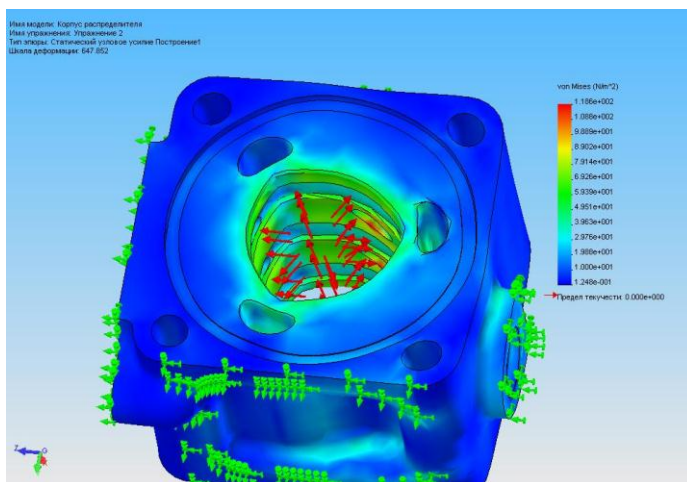
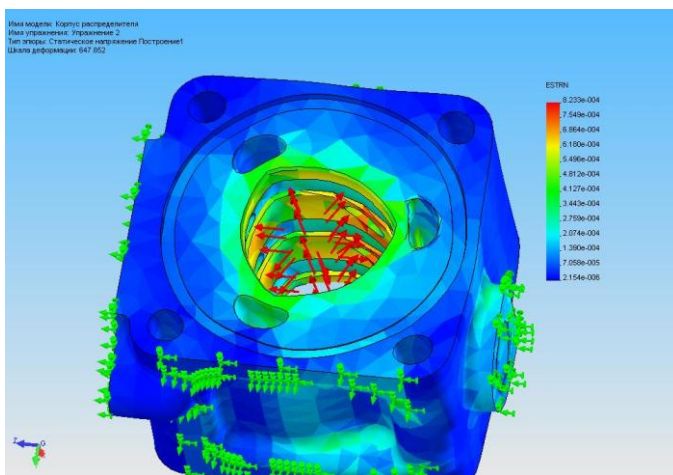
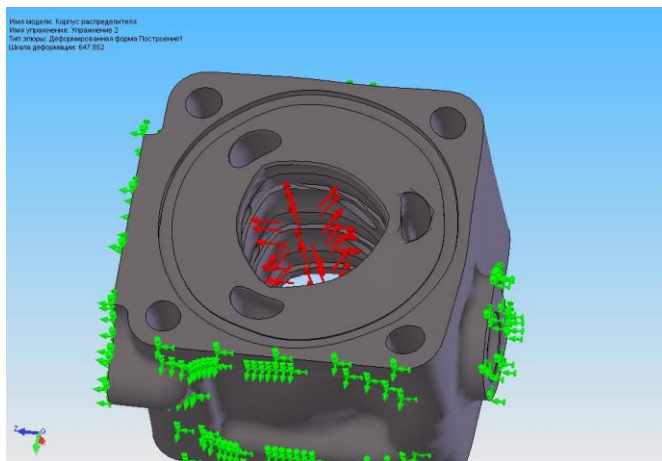


Рис.3.17. Результати розрахунків напружене-деформуючого стану корпусу ГРК у середовищі SolidWorks

3.3. Технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів ГРК з використанням розробленої технології

Технологічні рекомендації відновлення прецизійних отворів розробляються для технологічного процесу ремонту корпусу гідропідсилювача рульового керування трактора МТЗ-82. На підставі виконаних досліджень пропонується при обробці внутрішньої поверхні отвору під золотник застосування процесу розкочування (замість алмазного хонінгування).

Припуск на розкочування, чи збільшення діаметру внаслідок пластичного деформування поверхні, за даними досліджень [18], дорівнює 0,03 мм, тобто після обробки діаметр одержаного отвору повинен знаходитися у межах від 34,230 мм до 34,255 мм. Це надасть можливість сортувати отвори корпусів на 5 розмірних груп з кроком 0,005 мм, що значно знизить трудомісткість комплектувальних робіт (у порівнянні з існуючими технологіями) та може збільшити ресурс роботи з'єднання за рахунок зменшення початкового зазору.

Таким чином, при обробці прецизійних отворів у чавунних корпусах ГРК розробленим інструментом пропонуються такі технологічні параметри:

швидкість обертання інструменту:	195 об/хв;
подача:	0,35 мм/об;
натяг:	0,1 - 0,12 мм;
кількість проходів:	1;
наявність змащення:	без змащення;
швидкість обробки:	20,7 м/хв.

Ці параметри одержані розрахунковим шляхом і вимагають виробничої перевірки.

3.4. Висновки по розділу 3

За результатами виконаних досліджень зроблені такі висновки:

1. Експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання якісного поверхневого шару після обробки розкочуванням отворів чавунних корпусів при ремонті ГРК, а саме:

- поверхня після розкочування виходить відносно рівною із шорсткістю, що відповідає 9 класу чистоти. У місцях графітових включень особливо на гребінцях вихідної поверхні спостерігаються глибокі западини;

- структура поверхневого шару глибиною до 0,02 - 0,025 мм являє собою сильно деформовану зону напівзруйнованих зерен неміцно зв'язаних між собою;

- структура іншої деформованої зони не відрізняється від структури основного металу;

- твердість поверхневого шару, глибиною 0,02 - 0,025 мм і вище проти твердості основного металу на 44%;

- твердість деформованого металу, глибиною до 1,5 мм має твердість на 14,5% вище твердості основного металу;

- залишкові деформації змінюються майже пропорційно натягу при розкочуванні й досягають при натягу 0,15 мм величину 0,03 - 0,04 мм. Величина залишкової деформації при малих натягах не залежить від ширини пасків в отворі, при натягах понад 0,1 мм деформації вузьких крайніх пасків ростуть швидше, ніж широких, середніх, утворюючи корсетність отвору;

- оптимальними натягами, виходячи з відхилень, що допускаються, на точність обробки за технічними умовами, є натяги в 0,08 - 0,1 мм на діаметр.

2. Виконані розрахунки напружено-деформованого стану корпусу ГРК у середовищі SolidWorks. Отримані епюри дозволили заключити, що найбільші зони деформації спостерігаються в крайках отвору. Таким чином, при виборі режимів розкочування, необхідно вибрати мінімальний натяг, який дозволяє досягти необхідну точність і шорсткість.

3. Зроблені технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів ГРК з використанням розробленої технології.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Визначення собівартості відновлення корпусу гідропідсилювача

Собівартість відновлення деталі зазвичай розраховується за формулою:

$$C = M_{od} + Z_{od} + B_{cc} + B_{ye} + B_{цex} + E_m,$$

де M_{od} – вартість основних і допоміжних матеріалів;

Z_{od} – заробітна платня основна і додаткова;

B_{cc} – відрахування на соціальне страхування;

B_{ye} – витрати по експлуатації обладнання;

$B_{цex}$ – цехові витрати;

E_m – енергія для технологічних цілей.

Розрахунок основної та додаткової заробітної платні

$$Z_o = \frac{Z_{zod(i)} \cdot T_{n(i)}}{60};$$

$$Z_o = Z_o \cdot K_o,$$

де $Z_{zod(i)}$ – годинна тарифна ставка на операції;

$T_{n(i)}$ – норма часу;

K_o – коефіцієнт доплати, $K_o=0,3$.

Відрахування на соціальне страхування

$$B_{cc} = \frac{K_{cc} \cdot Z_{od}}{100},$$

де K_{cc} – відсоток відрахувань на соціальне страхування.

Додаткова заробітна плата

$$Z_o = 0,3 \cdot 85,50 = 25,70 \text{ грн.}$$

Відрахування до соціальних фондів

$$B_{cc} = 0,37(85,50 + 25,70) = 41,20 \text{ грн.}$$

Вартість електроенергії для технологічних цілей

$$B_{e.m.} = \frac{I \cdot U \cdot T_{umt} \cdot \Pi_{el}}{1000 \cdot 60},$$

де I, U – відповідно параметри сили струму та напруги

$$B_{e.m.} = \frac{12 \cdot 45,9 \cdot 3,83 \cdot 5,80}{1000 \cdot 60} = 20,40 \text{ грн.}$$

$K_{об}$ – витрати на експлуатацію обладнання

$$B_{об} = \frac{K_{об}}{100} (3_o + 3_o),$$

де $K_{об}$ – відсоток відрахувань на експлуатацію устаткування, $K_{об}=170$

$$B_{об} = \frac{170}{100} (85,50 + 25,70) = 189,10 \text{ грн.}$$

$B_{цех}$ – цехові витрати

$$B_{цех} = \frac{K_{цех}}{100} (3_o + 3_o),$$

де $K_{цех}$ – цехові витрати

$$B_{цех} = \frac{130}{100} (85,50 + 25,70) = 144,60 \text{ грн.}$$

де $C_{цех}$ – цехова собівартість

$$C_{цех} = 85,50 + 25,70 + 41,20 + 20,40 + 189,10 + 144,60 = 506,50 \text{ грн.}$$

Собівартість відновлення деталі

$$C_n = C_{від} + M_o = 506,50 + 32,0 = 538,50 \text{ грн.}$$

Річна економія

$$E_p = (\Pi_{об} - C_{об}) \cdot H_p,$$

де $\Pi_{об}$ – ціна нової деталі

$$E_p = (1900,00 - 538,50) \cdot 100 = 136150,00 \text{ грн.}$$

4.2. Загальні положення з техніки безпеки та охороні праці при механічній обробці деталей

Організація робіт у механічних цехах і дільницях, розміщення та експлуатація верстатів повинні відповідати "Правилам техніки безпеки і виробничої санітарії при холодній обробці металів".

Механічні цехи (дільниці) повинні бути розміщені в приміщеннях, обладнаних припливно-витяжною вентиляцією.

Верстати, під час роботи яких виділяються пил, пари або гази, мають бути обладнані місцевими відсмоктувачами. Розміщення обладнання повинно відповідати вимогам технологічного процесу і безпеки виконання робіт. Ширина проходів між верстатами повинна бути не менше 1,6 м.

Робітники-верстатники під час роботи на механічному устаткуванні: токарних, револьверних, фрезерних та інших верстатах, а також штампувальних пресах повинні проходити попередній інструктаж під час вступу на роботу медичний огляд.

Особи, зайняті на роботах у механічних цехах (дільницях), повинні застосовувати засоби індивідуального захисту відповідно до встановлених норм.

Перед увімкненням верстата робітник зобов'язаний переконатися, що пуск його нікому не загрожує. Під час роботи верстата забороняється передавати через нього будь-які предмети або інструменти. Під час установлення різального інструмента необхідно перевірити його справність і надійно закріпити інструмент у різцетримачі. Після повороту головки різцетримача слід надійно закріпити її. Різучий інструмент повинен підводитися до оброблюваного виробу плавно, без ривків.

Під час обробки довгомірних деталей на верстатах повинні встановлюватися люнети. Кінці оброблюваного матеріалу, що виступають за

шпиндель верстата, повинні захищатися нерухожими кожухами. Забороняється випускати кінці оброблюваного матеріалу за межі кожуха.

«Оброблення металів, що утворюють зливну стружку, має проводитися із застосуванням стружколомачів для дроблення стружки. Оброблення крихких металів і пилоутворюючих матеріалів повинно проводитися із застосуванням місцевих відсмоктувачів» [19].

«Під час роботи на токарних верстатах патрони і планшайби з виступаючими частинами повинні огороджуватися. Знімаючи (згвинчуючи) патрон або планшайбу, слід обертати їх тільки вручну. Забороняється для виконання цієї операції вмикати шпиндель верстата» [20].

Під час проведення ручного зачищення або шліфування деталей на токарному верстаті треба попередньо відвести вбік супорт і задню бабку, якщо вона вільна, при цьому дотримуватися необхідних умов безпечної роботи. Робити зачистку або шліфування деталей на верстаті наждачним папером дозволяється тільки за допомогою спеціальної державки.

Верстат повинен мати спеціальний захисний екран. У разі відсутності можливості встановлення екрана для захисту працюючого від стружки, що відлітає на верстаті, працюючий повинен застосовувати захисні окуляри.

«Під час роботи верстата забороняється торкатися обертових частин, вводити руки в зону їхнього руху, застосовувати для охолодження змочене ганчір'я, спиратися на верстат, класти на верстат деталі та інструменти. Перевірку заготовки або деталей на биття дозволяється проводити крейдою, закріпленою в оправку, що забезпечує безпеку» [19].

Забороняється знімати з верстата наявні огороження або тримати їх відкритими під час роботи верстата.

Під час роботи на свердлильних верстатах деталь повинна встановлюватися і закріплюватися в лещатах або кондукторі. Тримати деталь у руках забороняється. Видаляти відходи з просвердлених отворів дозволяється тільки після зупинки верстата і відведення інструмента.

Стояти проти різця під час роботи стругального верстата забороняється. Ріжучі частини фрез, що не стикаються з оброблюваними виробами, повинні бути закриті спеціальними огороженнями. Збірні фрези повинні мати пристрої, що запобігають вилітання зубів під час роботи.

Перед установкою шліфувальний круг повинен бути ретельно перевірений на відсутність тріщин шляхом легкого простукування дерев'яним молотком. Швидкісні круги повинні мати позначку про випробування. Застосовувати круги без позначки забороняється. Установку шліфувальних кругів на верстатах, не закріплених за робітником, повинен виконувати майстер або наладчик. Встановлювати шліфувальні круги, не призначені для даного верстата, забороняється. Під час постановки шліфувального круга на шпindel верстата між фланцем і кругом з обох боків повинні встановлюватися картонні прокладки. Зазор між посадковим отвором круга і діаметром шпинделя або втулки не повинен перевищувати 1-1,5 мм. Після встановлення шліфувального круга на верстат необхідно перевірити його на холостому ходу протягом 5 хв.

Усі роботи повинні виконуватися з максимальним застосуванням відповідної механізації й автоматизації та згідно з діючими стандартами, нормами і правилами з охорони праці та техніки безпеки. Устаткування, інструмент і пристосування повинні використовуватися тільки за їхнім прямим призначенням, перебувати в доступному місці і бути в стані технічної готовності.

Робоче місце має бути зручним для проведення відповідних операцій. Відходи виробництва, відпрацьовані продукти тощо повинні своєчасно видалятися з робочого місця. Установлення на робоче місце агрегатів, деталей, виробів масою понад 20 кг має бути механізоване.

Після закінчення роботи (у перервах), під час ремонту і заміни робочих органів, а також регулювальних роботах (крім спеціально обумовлених інструкцією заводу-виготовлювача) устаткування повинно бути відключене від силової мережі.

4.3. Висновки по розділу 4

Отримані результати дозволили у розділі 4 зробити наступні висновки:

1. Визначено собівартість відновлення корпусу гідروідсилювача, а також розрахований економічний ефект від впровадження запропонованої технології, який склав 136150,00 грн.
2. Викладено загальні положення з техніки безпеки та охороні праці при механічній обробці деталей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної магістерської роботи, яка присвячена підвищенню ефективності відновлення переривчастих отворів деталей мобільної сільськогосподарської техніки зроблені наступні висновки:

1. Аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати, що обробка отворів, що мають переривчасту поверхню, є одним з найбільш важких і трудомістких технологічних процесів. На прикладі обробки гідропідсилювачів рульового керування мобільної сільськогосподарської техніки показана, що необхідна якість поверхні отвору досягається застосуванням складної та енергоємної технології, яка базується на обробці різанням.

2. Порівняльне оцінювання технологічних способів фінішної обробки поверхонь, з точки зору трибологічних характеристик, енерговитрат та вартості операції вказує на ефективність використання способів ППД. Аналіз існуючих способів ППД дозволяє стверджувати про доцільність використання розкочування як ефективного методу обробки переривчастих отворів.

3. Експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання якісного поверхневого шару після обробки розкочуванням отворів чавунних корпусів при ремонті гідропідсилювачів рульового керування мобільної сільськогосподарської техніки, а саме:

- поверхня після розкочування виходить відносно рівною із шорсткістю, що відповідає 9 класу чистоти. У місцях графітових включень особливо на гребінцях вихідної поверхні спостерігаються глибокі западини;

- структура поверхневого шару глибиною до 0,02 - 0,025 мм являє собою сильно деформовану зону напівзруйнованих зерен неміцно зв'язаних між собою;

- структура іншої деформованої зони не відрізняється від структури основного металу;

- твердість поверхневого шару, глибиною 0,02 - 0,025 мм і вище проти твердості основного металу на 44%;

- твердість деформованого металу, глибиною до 1,5 мм має твердість на 14,5% вище твердості основного металу;

- залишкові деформації змінюються майже пропорційно натягу при розкочуванні й досягають при натягу 0,15 мм величину 0,03 - 0,04 мм. Величина залишкової деформації при малих натягах не залежить від ширини пасків в отворі, при натягах понад 0,1 мм деформації вузьких крайніх пасків ростуть швидше, ніж широких, середніх, утворюючи корсетність отвору;

- оптимальними натягами, виходячи з відхилень, що допускаються, на точність обробки за технічними умовами, є натяги в 0,08 - 0,1 мм на діаметр.

4. Зроблені технологічні рекомендації щодо обробки отворів корпусів гідропідсилювачів рульового керування мобільної сільськогосподарської техніки з використанням розробленої технології. Розрахована собівартість відновлення деталі, а також річний економічний ефект при впровадженні запропонованої технології.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шепеленко І.В., Гранкіна Н.С. Обґрунтування конструктивних параметрів інструменту для обробки переривчастих поверхонь отворів поверхневим пластичним деформуванням // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2006. Вип.47. – с.250-255.
2. Дзюра В.О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.
3. <https://erm.kntu.kr.ua/materiali/pidgotovka.html>
4. Черновол М.І., Пермяков О.А., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В., Горбулик В.І. Методологія технологічного проектування процесу відновлення деталей //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук.пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 10–16.
5. Гідропривід сільськогосподарської техніки: навчальне видання / О.М.Погорілець, М. С. Волянський, В. Д. Войтюк, С. І. Пастушенко; за ред. О.М. Погорільця. – К. : Вища освіта, 2004. – 368 с.
6. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей // Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки. Вип.7 (38)_І. – Кропивницький, 2023. С.30–36.
7. Попович В.В.. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Підручник/ В.В. Попович, В.В. Попович. – Львів: Світ, 2006. – 623 с.
8. Протягування та протяжний інструмент: монографія / Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2020. – 298 с

9. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: монографія / Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Шейкін С.Е., Шепеленко І.В., Чернявський О.В. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.

10. Киричок П.О. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів при оздоблювально-зміцнюючій обробці. Киричок П.О. Автореферат дисертації на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук. – Київ, 1995. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спец. 05.02.08 – Технологія машинобудування. – 32 с.

11. Киричок П.О. Комплексна оздоблювально-зміцнююча обробка циліндричних поверхонь/ П.О. Киричок, О.І. Хмілярчук // Машини і автоматизовані комплекси. 2003. - №8. С.40–48.

12. Ткачук А.А., Заблоцький В.Ю., Дзюра В.О. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування. Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – №5 (2). - с. 158-163.

13. Киричок П.О. Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталі та експлуатаційні характеристики поліграфічного обладнання / П. О. Киричок, А. В. Несхозієвський // Технологічні комплекси / Вид-во Луцьк. нац. технол. ун-ту. – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.

14. Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка ". - 2000. - № 412. - С. 3-11.

15. Киричок П.О. Класифікація пристроїв для оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / П.О. Киричок, І.В. Попов // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 2(32). – С. 181–185.

16. Системи 3D моделювання: Навчальний посібник/ Пальчевський Б.О., Валецький, Б.П., Вараніцький Т.Л. / Луцьк:, 2016 – 176 с.

17. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник/ С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, Ю.В. Клак – Луцьк: Вежа, 2018. – 172 с.

18. Шепеленко І.В. Удосконалення процесу обробки шатунних втулок поверхневим пластичним деформуванням при їх відновленні: (05.03.01) / Кіровогр. держ. техн. ун-т. — Кіровоград, 2003. - 17 с.

19. Геврик, Є. О. Охорона праці: Навчальний посібник для студ. внз / Є. О. Геврик ; МОН України. – К. : Ельга, НікаЦентр, 2004. – 280 с.

20. Основи охорони праці: навчальний посібник / Р. М. Івах, Я. І. Бедрій, Б. О. Білінський, М. М. Козяр ; за ред. Р. М. Івах. – 4-те вид., переробл. і допов. – К. : Кондор, 2010. – 464 с.