

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**  
**ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін**

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

НА ТЕМУ:

**«ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗКАТУВАННЯ ОТВОРІВ  
ДЕТАЛЕЙ ОБЕРТАННЯ ЗІ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ЗУСИЛЛЯ»**

**Виконав:**

здобувач освітнього ступеня «Магістр»  
освітньо-професійної програми  
«Агроінженерія» спеціальності  
208 «Агроінженерія» денної форми  
навчання

**РАШОВСЬКИЙ Олександр  
Миколайович**

**Керівник:**

канд. техн. наук, доцент

**ОЛЕНЮК Олександр Анатолійович**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_.

Шкала ECTS \_\_\_\_.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Допускається до захисту:**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»  
спеціальності 208 «Агроінженерія», канд. техн. наук, доцент,

\_\_\_\_\_

**ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

м. Кам'янець-Подільський, 2025

## ЗМІСТ

Завдання на виконання дипломної роботи.....	4
Анотація.....	6
Реферат .....	7
ВСТУП.....	8
<b>1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ .....</b>	<b>12</b>
1.1. Аналіз стану питання та актуальність теми дослідження .....	12
1.2. Класифікація та характеристика методів поверхневої пластичної деформації деталей.....	14
1.3. Значення відновлення зношених отворів для ресурсозбереження в агроінженерії.....	26
1.4. Формулювання задач досліджень .....	27
<b>2. НАУКОВІ ЗАСАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОБКАТУВАННЯМ .....</b>	<b>29</b>
2.1. Вплив поверхневого пластичного деформування на зносостійкість деталей .....	29
2.2. Конструкції пристроїв для розкатування отворів .....	34
2.3. Обґрунтування необхідності вдосконалення конструкції розкатника.....	42
<b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛОВИХ КОЛИВАНЬ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПРИ РОЛИКОВІЙ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ .....</b>	<b>45</b>
3.1. Методи зниження нестабільності силових параметрів при розкатуванні.....	45
3.2. Вплив геометричних похибок ролика на періодичність мікрорельєфу поверхні.....	49
<b>4. ПРОЄКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ.....</b>	<b>55</b>

4.1. Технологічні можливості роликового розкатування при відновленні деталей.....	55
4.2. Експлуатаційні та технологічні вимоги до розроблюваного пристрою .....	55
4.3. Опис конструкції та функціонування розкатного інструменту .....	56
4.4. Визначення силових та кінематичних параметрів процесу обробки ...	58
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ...	64
5.1. Аналіз умов праці при розкатуванні отворів деталей обертання .....	73
5.2. Розробка комплексу організаційних та технічних заходів з охорони праці та пожежної безпеки .....	67
5.3. Розрахунок вентиляції .....	68
5.4. Система контролю показників безпеки технологічного обладнання...	69
5.4.1. Карта контролю показників безпеки пристрою для розкатування роликів отворів.....	69
5.4.2. Технологічна картка контролю показників безпеки пристрою для розкатування роликів отворів.....	70
5.5. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	72
6. РОЗРОБКА БІЗНЕС-ПЛАНУ .....	78
6.1. Резюме .....	78
6.2. Пропоновані послуги .....	79
6.3. Виробничий план.....	80
6.4. Фінансовий план.....	86
6.5. Ризики та шляхи їх зниження.....	90
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	92
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	94
ДОДАТОК А Послуги зміцнення втулок та валів с.г. машин з допомогою поверхневого пластичного деформування.....	97
ДОДАТОК Б Копії друкованих статей .....	101
ДОДАТОК В Матеріали комп'ютерної презентації .....	102

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін  
Освітній ступінь «Магістр»  
Спеціальність 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**  
**Завідувач кафедри,**  
доцент \_\_\_\_\_ **Василь ДУГАНЕЦЬ**  
„\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

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

Здобувачу РАШОВСЬКОМУ Олександр Миколайовичу

**1. Тема роботи:** «Обґрунтування технології розкатування отворів деталей обертання зі стабілізацією зусилля»

**2. Керівник роботи** ОЛЕНЮК Олександр Анатолійович, доцент  
**Затверджено наказом** по закладу вищої освіти «Подільський державний університет» від «04» квітня 2025 року, № 355с

**Строк подання** здобувачем закінченої роботи «24» листопада 2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:**

1. Завдання на дипломну роботу;
2. Науково-технічна література;
3. Результати наукових досліджень.

**4. Зміст пояснювальної записки:**

Вступ

1. Аналіз науково-технічних передумов застосування поверхневої пластичної деформації при відновленні деталей
2. Наукові засади та технологічні передумови відновлення внутрішніх поверхонь обкатуванням
3. Дослідження впливу силових коливань на формування мікрорельєфу при роликівій обробці отворів
4. Проектування інструментального оснащення для фінішної обробки отворів
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях
6. Розробка бізнес-плану

Загальні висновки по роботі

Перелік використаних джерел

**5. Перелік ілюстративного матеріалу:**

1. Тема кваліфікаційної роботи, прізвище автора і керівника
2. Актуальність теми роботи та проблема дослідження
3. Об'єкт, предмет та методи досліджень
4. Мета і задачі кваліфікаційної роботи магістра
5. Практичне значення одержаних результатів
6. Характеристика методів поверхневої пластичної деформації

7. Конструкції жорстких головок для розкочування отворів
8. Двороликові головки для розкатки глибоких отворів
9. Методи зниження нестабільності при розкатуванні
10. Вплив геометричних похибок на періодичність мікрорельєфу
11. Конструкція розкатного інструменту
12. Параметри процесу обробки
13. Показники ефективності реалізації проєкту
- 14-15. Загальні висновки по роботі

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Консультант з нормоконтролю	ДЕВІН В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання «04» квітня 2025р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділів дипломної роботи	Строк виконання розділів роботи		Підпис керівника
		планово	фактично	
	Вступ	15.04.25	15.04.25	
1	Аналіз науково-технічних передумов застосування поверхневої пластичної деформації при відновленні деталей	12.05.25	12.05.25	
2	Наукові засади та технологічні передумови відновлення внутрішніх поверхонь обкатуванням	05.06.25	05.06.25	
3	Дослідження впливу силових коливань на формування мікрорельєфу при роликовій обробці отворів	30.06.25	30.06.25	
4	Проектування інструментального оснащення для фінішної обробки отворів	18.09.25	18.09.25	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.10.25	15.10.25	
6	Розробка бізнес-плану	31.10.25	31.10.25	
	Загальні висновки по роботі	06.11.25	06.11.25	
	Перелік використаних джерел	18.11.25	18.11.25	
	Додатки	24.11.25	24.11.25	

Здобувач

Олександр РАШОВСЬКИЙ

Керівник

Олександр ОЛЕНЮК

## **АНОТАЦІЯ**

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання підвищення довговічності відновлених отворів деталей машин шляхом вдосконалення технології поверхневого пластичного деформування. Проведено аналіз причин виникнення дефектів при обробці внутрішніх поверхонь в умовах ремонтного виробництва та обґрунтовано необхідність стабілізації робочого навантаження. Розроблено нову конструкцію роликового інструменту, яка дозволяє компенсувати похибки форми заготовок і нівелювати вплив радіального биття обладнання. Експериментально визначено раціональні режими розкатування, що забезпечують формування якісного поверхневого шару з високими показниками мікротвердості. Впровадження запропонованої технології сприяє зростанню ресурсу відновлених вузлів та підвищенню ефективності ремонту сільськогосподарської техніки.

## **THE SUMMARY**

The qualification paper solves the relevant task of increasing the durability of restored machine part holes by improving surface plastic deformation technology. An analysis of defect causes during internal surface processing in repair production conditions was conducted, and the necessity of working load stabilization was substantiated. A new design of a roller tool has been developed, which allows compensating for workpiece shape errors and eliminating the influence of equipment radial runout. Rational burnishing modes ensuring the formation of a high-quality surface layer with high microhardness indicators were experimentally determined. Implementation of the proposed technology contributes to increasing the service life of restored units and improving the efficiency of agricultural machinery repair.

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 93 аркушах формату А4, яка вміщує 6 розділів, 11 таблиць, 13 рисунків, 26 найменувань використаних джерел і презентаційного матеріалу на 15 аркушах.

Метою роботи є підвищення довговічності отворів деталей сільськогосподарської техніки шляхом розробки технології розкатування зі стабілізацією робочого зусилля.

У роботі використано комплекс методів: аналітичний огляд способів поверхневого пластичного деформування, теоретичне моделювання контактної взаємодії інструменту з поверхнею, експериментальні дослідження впливу режимів обробки на якість поверхні та техніко-економічний аналіз. Встановлено, що стабілізація зусилля притискання ролика дозволяє нівелювати вплив радіального биття та запобігти утворенню хвилястості.

Розроблено нову конструкцію пристрою для розкатування, яка забезпечує високу якість відновлення отворів в умовах ремонтного виробництва. Визначено оптимальні режими обробки, що гарантують зниження шорсткості та підвищення мікротвердості поверхневого шару. Впровадження технології дозволяє збільшити ресурс відновлених деталей та зменшити витрати на ремонт техніки.

Ключові слова: ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, РОЗКАТУВАННЯ ОТВОРІВ, СТАБІЛІЗАЦІЯ ЗУСИЛЛЯ, ПОВЕРХНЕВЕ ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасний розвиток агропромислового комплексу України нерозривно пов'язаний із підвищенням ефективності використання машинно-тракторного парку. Надійність та довговічність сільськогосподарської техніки значною мірою визначаються ресурсом її основних вузлів та агрегатів, робота яких відбувається у важких умовах динамічних навантажень, абразивного середовища та недостатнього змащування. Статистика відмов свідчить, що понад 80% випадків виходу машин з ладу пов'язані зі зношуванням робочих поверхонь деталей, причому значну частку серед них займають спряження типу «вал-отвір» (гільзи циліндрів, втулки важелів, посадкові місця підшипників у корпусних деталях).

Відновлення спрацьованих отворів є одним із найбільш складних та відповідальних завдань ремонтного виробництва. Традиційні методи механічної обробки, такі як розточування або шліфування, дозволяють відновити геометричні розміри, проте не завжди забезпечують необхідні фізико-механічні властивості поверхневого шару. Більше того, залишкові сліди різця або абразиву стають концентраторами напружень, що прискорює втомне руйнування та інтенсифікує процес зношування. В умовах постійного зростання вартості нових запасних частин та комплектуючих, пошук ресурсозберігаючих технологій відновлення стає критично важливим завданням для інженерно-технічних служб аграрних підприємств.

Одним із найбільш перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є застосування методів поверхневого пластичного деформування (ППД), зокрема розкатування роликками. Цей метод дозволяє не лише суттєво знизити шорсткість поверхні, але й сформувати зміцнений поверхневий шар із залишковими напруженнями стискання, що підвищує твердість, зносостійкість та втомну міцність деталей. Однак широке впровадження технології розкатування в умовах ремонтних майстерень стримується низкою технологічних проблем.

Головною перешкодою є те, що існуючі конструкції жорстких розкатників розраховані на стабільні умови масового виробництва і вимагають високої точності попередньої підготовки отвору, що важко забезпечити при ремонті зношених деталей. Використання ж пружних розкатників, які здатні компенсувати похибки форми, часто призводить до виникнення дефекту хвилястості поверхні. Це явище обумовлене радіальним биттям інструменту або шпинделя верстату, що викликає коливання зусилля деформування. Хвилястість значно зменшує фактичну площу опорної поверхні, погіршує умови утримання мастила та прискорює припрацювання, що нівелює позитивний ефект від зміцнення.

Таким чином, виникає об'єктивна необхідність у вдосконаленні технології розкатування шляхом створення адаптивних інструментів, здатних забезпечувати стабілізацію робочого зусилля незалежно від похибок попередньої обробки та биття обладнання. Розробка технології розкатування отворів зі стабілізацією зусилля дозволить поєднати переваги пружного контакту з точністю жорсткого інструменту, забезпечуючи високу якість відновлених поверхонь в умовах типових ремонтних майстерень. Це дозволить суттєво підвищити міжремонтний ресурс сільськогосподарської техніки та знизити експлуатаційні витрати, що робить тему кваліфікаційної роботи актуальною та своєчасною.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами досліджень.* Робота виконувалась у відповідності з переліком пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок затверджених Постановою Кабінету Міністрів України.

*Мета і завдання досліджень.* Метою роботи є підвищення довговічності та якості відновлення отворів деталей обертання шляхом обґрунтування та розробки технології розкатування інструментом зі стабілізацією робочого зусилля.

Для досягнення мети дослідження необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи поверхневого пластичного деформування та теоретично обґрунтувати причини виникнення хвилястості при обробці внутрішніх поверхонь в умовах ремонтного виробництва.

2. Розробити конструкцію пристрою для розкатування отворів, що забезпечує стабілізацію зусилля деформування та компенсацію радіального биття інструменту.

3. Експериментально дослідити вплив режимів обробки (зусилля, подачі, швидкості) запропонованим пристроєм на параметри шорсткості, мікротвердості та геометричної точності відновлених поверхонь.

4. Обґрунтувати раціональні технологічні режими розкатування для забезпечення заданих показників якості поверхневого шару деталей сільськогосподарських машин.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес поверхневого пластичного деформування внутрішніх циліндричних поверхонь деталей машин при їх відновленні.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу конструктивних параметрів розкатника та режимів обробки на формування якісних характеристик поверхневого шару (шорсткість, хвилястість, мікротвердість) в умовах нестабільності силового навантаження.

*Методи досліджень.* Методи досліджень, використані в роботі, включають комплекс аналітичних, експериментальних та теоретичних підходів для досягнення поставлених завдань.

Аналітичні методи були застосовані для критичного огляду науково-технічної літератури та існуючих патентних рішень у галузі зміцнення деталей методами ППД. Це дозволило систематизувати причини виникнення дефектів при обробці отворів, зокрема хвилястості, та визначити перспективні напрямки вдосконалення конструкцій роликів розкатників для умов ремонтного виробництва.

Теоретичні методи базувалися на положеннях теорії пружності та пластичності для моделювання контактної взаємодії ролика з поверхнею деталі. Було проведено розрахунки силових параметрів процесу розкатування та аналіз динаміки інструменту, що дозволило обґрунтувати необхідність стабілізації зусилля притискання та розробити кінематичну схему нового пристрою, який мінімізує вплив радіального биття на якість обробки.

Експериментальні методи включали проведення натурних випробувань розробленого пристрою на токарно-гвинторізному обладнанні. Здійснювалося вимірювання параметрів шорсткості поверхні ( $R_a$ ,  $R_z$ ) за допомогою профілометрів, визначення мікротвердості поверхневого шару та оцінка геометричної точності отворів. Для обробки отриманих даних та встановлення оптимальних режимів різання застосовувалися методи математичної статистики та порівняльного аналізу.

*Практичне значення одержаних результатів.* Нова конструкція роликового розкатника зі стабілізацією зусилля може бути виготовлена та використана на базі існуючого верстатного парку ремонтних майстерень. Запропоноване технічне рішення дозволяє виключити появу хвилястості на обробленій поверхні та знизити вимоги до точності попередньої підготовки отворів, що спрощує технологічний процес відновлення.

Встановлені раціональні режими розкатування забезпечують суттєве підвищення якості поверхневого шару відновлених втулок та гільз, що сприяє збільшенню їх зносостійкості та експлуатаційного ресурсу. Впровадження запропонованої технології дозволяє знизити собівартість ремонту сільськогосподарської техніки за рахунок зменшення витрат на придбання нових запасних частин та підвищення надійності відновлених вузлів.

*Апробація результатів роботи.* За матеріалами роботи опубліковано статтю у збірнику наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців.

# 1 АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ

## 1.1 Аналіз стану питання та актуальність теми дослідження

Ефективність та надійність роботи сучасної сільськогосподарської техніки значною мірою визначаються технічним станом деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, змінних навантажень і агресивного зовнішнього середовища. До найбільш навантажених елементів належать деталі типу «отвір–вал», зокрема втулки, гільзи, корпусні елементи з посадковими отворами під підшипники, пальці та інші спряження, в яких відбувається концентрація контактних напружень і накопичення пошкоджень поверхневого шару. Експлуатаційні спостереження свідчать, що саме знос і втомне руйнування поверхонь отворів часто є причиною втрати працездатності вузлів та агрегатів, що приводить до незапланованих простоїв машин і підвищення витрат на ремонт. Умови роботи цих деталей у сільськогосподарських машинах ускладнюються дією пилу, вологи, змінного навантаження, ударних навантажень, що прискорює розвиток зношування, корозійно-механічних та втомних процесів у поверхневому шарі. [2]

Класичні методи відновлення посадкових отворів корпусних деталей, такі як наплавлення з подальшим мехобробленням, розточування до ремонтних розмірів, встановлення ремонтних втулок з механічною або клейовою фіксацією, забезпечують відтворення розмірної точності, але не завжди гарантують необхідний рівень зносостійкості та втомної витривалості відновлених спряжень. Додатковою проблемою є підвищені витрати матеріалу та енергії при застосуванні цих технологій, а також необхідність використання високоточного обладнання, що збільшує собівартість ремонтних операцій. В умовах ремонтних підприємств агропромислового комплексу, де номенклатура деталей широка, а розміри партій малі, постає завдання пошуку

таких технологій відновлення, які б поєднували високу ефективність, універсальність та відносну простоту реалізації.

Одним з перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання методів поверхневого пластичного деформування (ППД), зокрема обкатування роликми та кульками, які дозволяють одночасно покращувати мікрогеометрію та зміцнювати поверхневий шар матеріалу без суттєвої зміни геометрії деталі. Дослідження показують, що ППД сприяє формуванню сприятливого напруженого стану у поверхні (залишкові напруження стискання), підвищенню мікротвердості та структурній однорідності металу, що призводить до зростання зносостійкості, контактної витривалості та опору втомі. Особливо актуальним є застосування ППД при відновленні отворів деталей, де, на відміну від валів, доступ до поверхні ускладнений, а інструмент повинен забезпечувати стабільний контакт у замкнутому об'ємі. У цьому контексті технологія розкатування внутрішніх поверхонь роликми розглядається як один із найефективніших методів фінішного зміцнення і коригування форми отворів. [3]

Водночас аналіз існуючих рішень засвідчує, що реалізація технології розкатування отворів має низку суттєвих обмежень, пов'язаних насамперед із забезпеченням стабільності зусилля обкатування. Жорсткі розкатники, які широко застосовуються у масовому виробництві, потребують високої точності попередньої обробки отворів і не пристосовані до умов ремонтного виробництва, де форма і розміри отворів мають значні відхилення. Пружні схеми навантаження, що використовують циліндричні пружини, частково компенсують похибки форми, проте чутливі до радіального та торцевого биття роликів; це призводить до коливань контактного тиску, появи хвилястості на обробленій поверхні і, як наслідок, до зниження фактичної опорної площі та довговічності спряження. Таким чином, існує науково-прикладна проблема створення такої технології та конструкції розкатного пристрою, які б забезпечували стабілізацію робочого зусилля при обробці отворів у реальних умовах ремонтного виробництва.

З урахуванням зазначеного, тема кваліфікаційної роботи, що присвячена обґрунтуванню технології розкатування отворів деталей обертання зі стабілізацією зусилля, є актуальною як з теоретичної, так і з практичної точок зору. З теоретичної позиції дослідження спрямоване на уточнення закономірностей формування напружено-деформованого стану та мікрогеометрії внутрішніх поверхонь при змінених схемах навантаження роликів. З практичної — результати роботи можуть бути використані для розробки та впровадження в ремонтне виробництво адаптивних розкатних пристроїв, здатних забезпечити підвищення ресурсу вузлів із посадковими отворами без значного ускладнення технологічного процесу та збільшення його вартості. Це безпосередньо пов'язано з підвищенням ефективності використання парку сільськогосподарської техніки, зменшенням обсягів списання деталей і економією матеріальних ресурсів, що відповідає сучасним вимогам до ресурсозбереження та сталого розвитку агропромислового виробництва. [4]

## **1.2 Класифікація та характеристика методів поверхневої пластичної деформації деталей**

Методи поверхневої пластичної деформації розділяють на ударні й статичні. При статичних методах обробки інструмент, робочі тіла або середовища діють на поверхню, що оброблюється, з визначеною постійною силою  $P$ , здійснюється плавне переміщення осередків дії, які послідовно проходять всю поверхню, яка підлягає обробці. При цьому інерційні сили не здійснюють істотного впливу на поверхневу пластичну деформацію. До таких методів відносяться різноманітні види вигладжування (рис. 1.1, *а*) і накатування (рис. 1.1, *б*), а також метод однократного обтискування поверхні, що обробляється (рис. 1.1, *в*), без переміщення осередків дії.

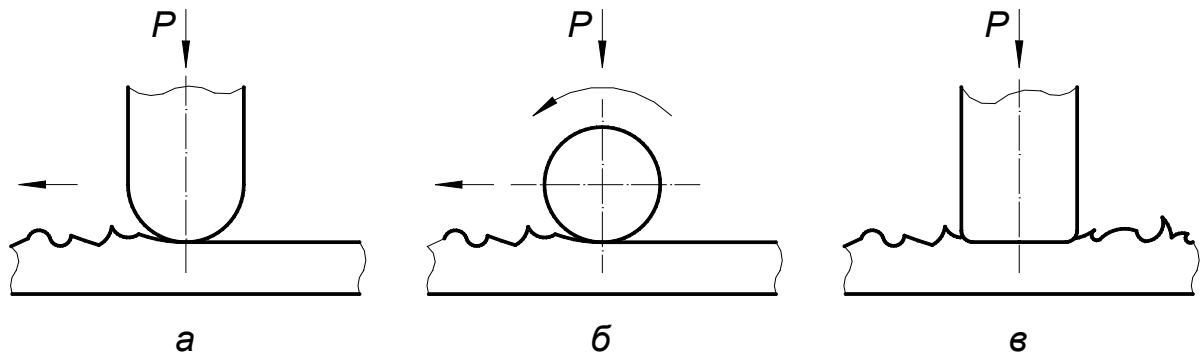


Рисунок 1.1 - Характер контактної взаємодії інструмента з поверхнею, яка обробляється при різних методах поверхневої пластичної деформації

Здійснення пластичної деформації поверхневого шару деталей при статичному методі зміцнення застосовується обкатування роликками або кульками (наклеп шляхом втискання у поверхню, що обробляється, твердого ролика або кулі, котрі котяться по ній). Незважаючи на це, метод обробки тиском давно застосовується в промисловості і досить широко освітлений в технічній літературі, багато подібні умови його використання недостатньо вивчені, що, за частіш, робить його застосування мало ефективним. Вирішальним фактором, який визначає техніко-економічні показники обкатування роликками являється правильний вибір схеми і параметрів обкатки. [5]

Роликові обкатники поділяються на пристрої пружної та жорсткої дії; одно- і багатороликові; з нерегульованим роликом і роликом, положення якого відносно заготовки регулюється; з циліндричними і конічними роликками.

Основні кінематичні схеми обкатування:

1 – примусове обертання заготовки і примусова поздовжня подача обкатника або заготовки;

2 – примусове обертання роликків при вільному або примусовому обертанні заготовки з примусовою поздовжньою подачею або з самовтягуванням обкатника;

3 – обробка засобом “втискання” з поперечною подачею інструмента.

Велике число конструктивних варіантів обкатувальних пристроїв та кінематичних схем обкатування ускладнюють задачу технолога при визначенні оптимального варіанта, але накоплений виробничий досвід і результати досліджень в теперішній час дозволяють встановити область рентабельного використання кожного з них. [4]

Обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь роликівими обкатниками пружної дії виготовляється з метою зміцнення деталей та підвищення зносостійкості. Калібрування, зміну початкової форми заготовки і підвищення точності розмірів в даному випадку здійснити неможливо, так як ролики пружно притискаються до поверхні, що оброблюється, форма якої при обкатуванні копіюється. Переваги обкатників пружної дії: спокійна, плавна робота та рівномірне зусилля обкатування по всій поверхні, що оброблюється, незалежно від точності форми заготовки і правильності її установки на верстаті. В результаті створюється більш однорідна поверхня по відношенню до шорсткості, наклепу та напружень, що виникають в поверхневому шарі матеріалу. Обкатування може виконуватися одним, двома та трьома роликівими.

Однороликові обкатники доцільно застосовувати при жорстких заготовках середнього діаметру, в умовах індивідуального і дрібносерійного виробництва. Однороликові обкатники виконуються в двох конструктивних варіантах: з постійною і регулюємою установкою ролика відносно вісі заготовки, що оброблюється.

Вісь ролика нерегульованого обкатника встановлюється суворо паралельно вісі заготовки, в результаті чого при поздовжній його подачі відбувається значне тертя та проковзування ролика відносно поверхні, що оброблюється. Це в багатьох випадках може привести до утворення хвилястості та збільшення шорсткості поверхні, нагріванню заготовки. Значно кращі результати отримуються в тому випадку, коли вісь ролика розгортається під певним кутом в горизонтальній площині відносно вісі заготовки. Критерієм правильності установки ролика відносно заготовки може служити форма відбитка ролика при втисканні його в метал заготовки.

Однороликовими пристроями на токарних верстатах обкатується широка номенклатура валів різноманітних розмірів, у тому числі прокатні валики, штанги і плунжера пресів, ротори, вісі, пальці. Використання однороликових пристосувань простіше і зручніше, ніж багатороликових.

Робоче зусилля при обкатуванні валів обмежене не тільки можливостями верстату, але також і жорсткістю деталі. По мірі збільшення довжини вала зростає безпека недопустимого прогину його під дією радіальної сили. До деякої міри можна уникнути прогинів застосуванням люнетів, але люнети скорочують технологічні можливості обробки, збільшують допоміжний час. В даному випадку більш раціональним для обкатування довгих валів являється застосування трьохроликових пристроїв.

Двохроликові обкатники доцільно застосовувати при обкатуванні черв'яків, в умовах індивідуального і дрібносерійного виробництва. Двохроликові обкатники виконуються в двох конструктивних варіантах: з постійною і регулюємою установкою ролика відносно вісі заготовки, що оброблюється. Регулювання роликів здійснюється за рахунок коливаючихся шайб. Двохроликовими пристроями на токарних верстатах обкатується широка номенклатура гвинтів різноманітних розмірів, прокатні валики, штанги і плунжера пресів, ротори, вісі, пальці. [5]

Трьохроликові обкатники – інструмент більш складний і трудомісткий у виготовленні, ніж двохроликові. Розташування роликів навколо заготовки, що обробляється, через  $120^{\circ}$  дозволяє зрівноважити тиск, що створюють ролики, в результаті чого деформація заготовки не здійснюється, а вузли верстата, на якому виконується обробка, не відчувають шкідливих навантажень. Із збільшенням числа роликів підвищується і продуктивність, так як стає можливим працювати з підвищеними подачами. В теперішній час трьохроликові обкатники пружної дії виконуються в трьох варіантах: механічні, гідравлічні та пневматичні.

В обкатниках першого типу пружним елементом являється спіральна або плоска пружина, яка розрахована на певне зусилля. Більш плавне і тонке

регулювання тиску при обкатуванні забезпечують пневматичні та гідравлічні обкатники у порівнянні з пружинними.

Всі описані роликові обкатники працюють по одній і тій схемі, яка найчастіше застосовується – обертання заготовки та переміщення вздовж її вісі роликів здійснюється примусово.

При застосуванні цих пристроїв є великий недолік. Коли шпиндельний вал верстату обертається з биттям, рідина (у гідравлічних) або повітря (у пневматичних) не в змозі миттєво протидіяти цим коливанням і ролики не забезпечують необхідної жорсткості.

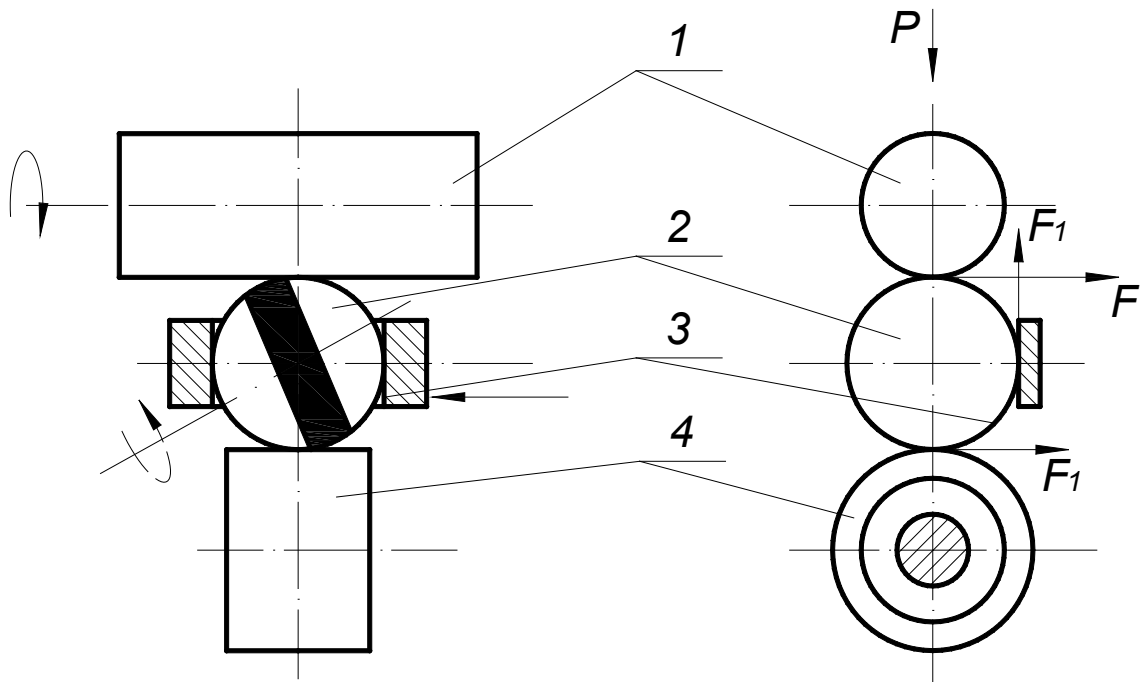
З метою калібрування та зміцнення можуть бути використані роликові обкатники жорсткої дії, в яких ролики жорстко притискаються з певним зусиллям до поверхні, що обробляється. В цьому випадку за рахунок перерозподілення об'ємів металу в деформуємій зоні при певних умовах може бути досягнуто виправлення геометричної форми вихідної поверхні та підвищення точності діаметрального розміру. [6]

Найкращі умови обкатування, які забезпечують утворення однорідної поверхні із рівномірно зміцненим поверхневим шаром металу, створюються при роботі планетарними обкатниками пружної дії.

Схема обкатування кулькою зовнішньої циліндричної поверхні зображена на рисунку 1.2.

Особливістю кулькових обкатників і розкатників у порівнянні з роликовими являється відсутність примусової вісі обертання кулі, самовстановлюваність вісі кульки відносно поверхні, що обробляється і, як слід, незначне проковзування. Також точечний (умовно) контакт між кулькою і поверхнею заготовки створює кращі умови пластичного деформування металу, дозволяє працювати з меншим тиском, оброблюючи без деформації мало жорсткі заготовки, віддає момент перенаклепу і руйнування поверхневого шару металу. Використання в якості деформуючого елемента купуємих кульок від кулькопідшипників полегшує і здешевлює застосування

кулькових інструментів, особливо в умовах індивідуального і дрібносерійного виробництва.



Умовні позначення:

- 1 - заготовка;      3 - сепаратор;  
2 - куля;            4 - опорний кулькопідшипник.

Рисунок 1.2 - Схема обкатування кулькою зовнішню циліндричну поверхню

Як видно зі схеми, умовою обертання кулі без проковзування відносно поверхні, що оброблюється, являється дотримання нерівності:

$$Fr_{ш} > F_1r_{ш} + F_2r_{ш} \quad (2.1)$$

де  $Fr_{ш}$  – момент, який приводить кулю в обертання;

$F_1r_{ш}; F_2r_{ш}$  – моменти, які гальмують обертання кулі;

$r_{ш}$  – радіус кулі.

У нерівності

$$F = Pf; F_1 = P_1f_1; F_2 = (P_1 + P_2)f_2 \quad (2.2)$$

де  $F$  – сила тертя між кулею і заготовкою;

$F_1$  – сила тертя між кулею і зовнішнім кільцем кулькопідшипника;

$F_2$  – сила тертя між кулею і сепаратором;

$f$  – коефіцієнт тертя ковзання між кулею і заготовкою;

$f_1$  – коефіцієнт тертя кочення між кулею та зовнішнім кільцем кулькопідшипника;

$f_2$  – коефіцієнт тертя між кулею та сепаратором.

Не дотримання цієї умови приводить до проковзування кулі відносно поверхні, що оброблюється, і навіть до повної його зупинки, в результаті чого замість очікуваного зміцнення і зменшення шорсткості може відбутися руйнування поверхневого шару металу і погіршення якості поверхні.

Приведена умова обкатування кулею визначає і конструкцію кулькових обкатників, в яких тертя між кулею і опорами повинно бути мінімальним. Таким же чином, як і роликові, шарикові обкатники виконуються одно-, трьох- і багатокулькові, в більшості випадків пружної дії. [6]

Однокулькові обкатники – простий, дешевий у виготовленні, але порівняно малопродуктивний інструмент, який застосовується в індивідуальному, а також в дрібносерійному виробництві на токарних та револьверних верстатах.

Трьохкульковий обкатник продуктивніше однокулькового (із збільшенням числа кульок можливе обкатування з великими подачами), але менш універсальний, так як призначений для обробки деталей, діаметр яких коливається в порівняно невеликих межах. При обробці маложорстких деталей великої довжини для запобігання їхньої деформації доцільно застосовувати трьохкулькові обкатники.

Багатокулькові обкатники жорсткої дії знайшли широке застосування. Обкатник виконаний у вигляді втулки, в яку встановлено обойму, що складається із нерухомої сталевий загартованої опори і рухомої опори. Між

ними розташовані шість кульок діаметром 25,4 мм. Кулі роз'єднані бронзовим сепаратором.

Обкатник закріплюється в патроні або на планшайбі токарного верстату і отримує обертання від шпинделя верстату, а заготовка, закріплена в супорті, переміщується в поздовжньому напрямку. Подача заготовки може здійснюватися завдяки задній бабці. Всі описані роликові та кулькові обкатники використовуються при чистовій обробці тиском, що виконується як самостійна операція, або як перехід після попереднього точіння або шліфування, що в окремих випадках понижує ефективність обкатування.

Вказані методи поверхневої пластичної деформації забезпечують підвищення зносостійкості, опір втомі, контактної витримки та інших експлуатаційних властивостей деталей, що оброблюються, на 20 – 50 %, а в деяких випадках в 2 – 3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу і призначення оптимальних режимів обробки). [7]

Наряду з забезпеченням високої якості поверхні поверхневої пластичної деформації в багатьох випадках дозволяє механізувати ручний труд та підвищити продуктивність на кінцевих операціях. Збільшення твердості і міцності металу поверхневим наклепом, а також ріст опорної поверхні при обкатуванні роликками дозволяють розглядати його як один з ефективних способів підвищення працездатності і, зокрема, зносостійкості деталей машин.

При терті зі змащенням велике значення має здатність третьових поверхонь зберігати під навантаженням масляну плівку, що запобігає виникненню осередків безпосереднього контакту металевих поверхонь. Результати багатьох досліджень показують, що обкатані поверхні володіють підвищеною несучою здатністю. Навантаження заїдання обкатаних сталевих і чавунних роликів у парі зі сталевими обоймами в середньому на 20% вище, ніж шліфованих. У випадку перенаклепу поверхні деталі її знос зростає.

При методах ударної дії (рис. 1.3) інструмент, робочі тіла або середовища багатократної дії на всю поверхню, яка обробляється, або на її

частину, при цьому сила дії  $P$  в кожному циклі змінюється від нуля або від деякого значення  $P_1$  до максимуму, а у випадку ударної локальної дії осередок деформування може (як і в статичних методах) послідовно та рівномірно проходити всю поверхню, яка обробляється.

При поверхневій пластичній деформації можуть бути застосовані такі інструменти: ролик, куля з примусовою віссю обертання і без неї, гладилка, дрон з нерізальними кільцями і т.п. В якості робочих тіл при поверхневій пластичній деформації можуть бути використані дріб, кульки із сталі, скла, пластмаси та інші. Робочим середовищем при поверхневій пластичній деформації можуть бути рідина, газ та їх суспензії з частинками абразиву.

Статичні методи поверхневої пластичної деформації, як правило, забезпечують меншу шорсткість поверхні із благосприятливою формою мікронерівностей. За допомогою методів ударної дії можливо досягнути великої ступені зміцнення, яка характеризується ступенем підвищення мікротвердості, значеннями стискаючих залишкових напружень і товщиною зміцненого шару. Це відноситься до ударних та статичних методах, близьким по питомому навантаженню і кратності її прикладення.

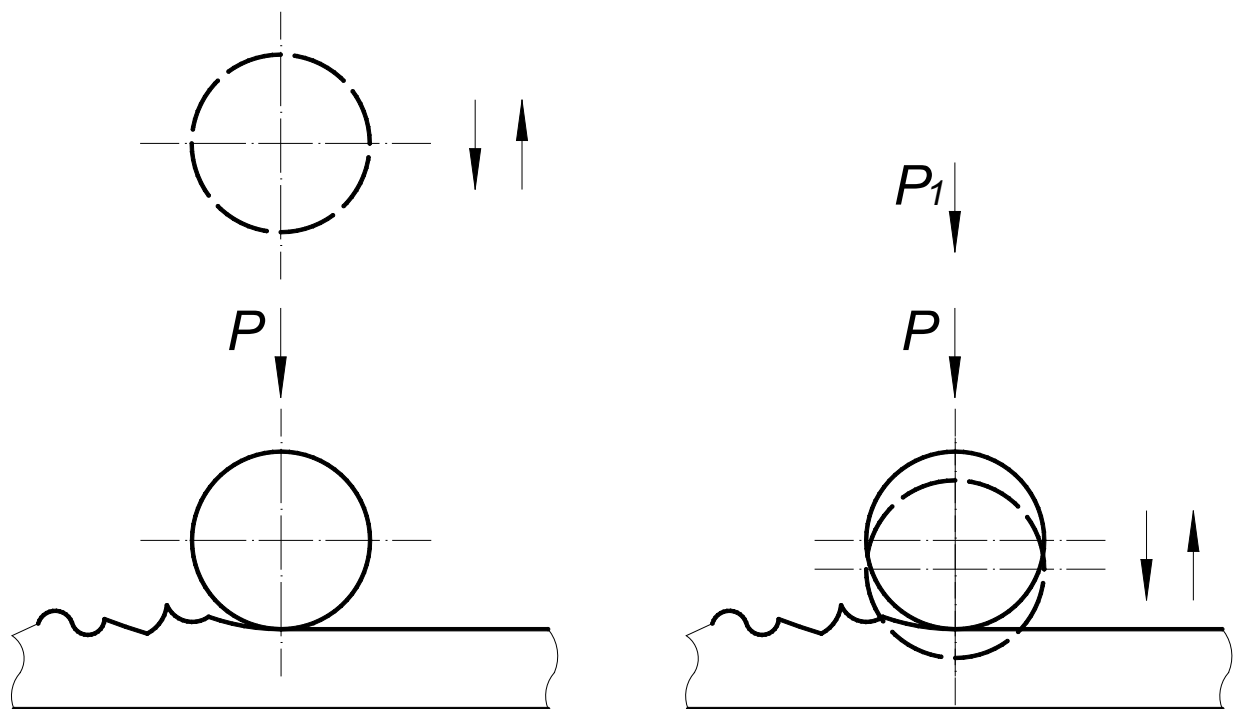


Рисунок 1.3 - Характер контактної взаємодії інструмента з поверхнею, яка обробляється при методах ударної дії

Однак обробка деякими ударними методами уступає по ступеню зміцнення обробці статичним методом, наприклад, при віброударній обробці ступінь зміцнення буває, як правило, менше, ніж при накатуванні, так як при накатуванні існує тангенціальна складова зусилля обкатування в напрямку подачі, що приводить до підвищення ступеня деформації. [5]

Загальні вимоги включають: вимоги до виробів які оброблюються; технологічним процесам обробки поверхневої пластичної деформації; обладнанню; оснащенню, апаратурі та інструменту, основним технологічним матеріалам, виробам, які оброблюються, контролю обробки технологічним процесом, яка слідує за поверхневою пластичною деформацією обробки та збиранню виробів, техніці безпеки та виробничій санітарії при обробці поверхневою пластичною деформацією.

Для здійснення пластичної деформації поверхневого шару деталей при динамічному методі зміцнення застосовують наступні технології: дробоструменевий наклеп, який здійснюється струменем сталевий або чавунної дробі; чеканка, здійснюється спеціальними бійками, які наносять багаточисельні удари; наклеп ротаційним зміцненням, які викликають багаточисельні упорядковані удари шариками або роликками, розташованими по периферії обертаючихся дисків; гідроабразивний наклеп, який здійснюється струменем рідини, яка має абразиви різноманітної зернистості; безабразивна ультразвукова фінішна обробка.

Дробоструменевий наклеп викликає порівняно неглибоке проникання пластичної деформації в обробляємих поверхнях (до 0,5 – 0,7 мм) і застосовується для невеликих за розмірами деталей складних форм (гвинтових пружин ресори, шестерні та ін.). Дробоструменевий наклеп здійснюється сталевий або чавунний дробом на спеціальних установках. Широке застосування отримала дробоструменева установка ДУ-1. На установці оброблюються круглі та плоскі деталі.

Абразивний матеріал піддається до пістолету із стиснутим повітрям через сопло та відводиться обернено в систему кільцевою відсмоктувальною голівкою, канал якої оточує робоче сопло.

Деталі невеликих розмірів, малої, жорсткої або складної форми (виті пружини, шестерні, ресори, мембрани, шліцьові вали та ін.) підлягають наклепу дробу. При цьому використовують переважно сталеву дріб діаметром 0,8 – 2 мм. Глибина наклепу при дробоструменевої обробці не перевищує 0,8 мм. Після дробоструменевої обробки поверхня деталі приймає деяку шорсткість, і подальшій обробці не підлягає. Режими обробки визначаються швидкістю подачі дробу (до 70 – 90 м/сек), витратою дробу на одиницю часу, а також експозицією (час, протягом якого оброблювана поверхня знаходиться під ударами дробу).

Дробоструменева обробка застосовується для серійних деталей, і режими обробки встановлюються експериментальним підбором. Поверхня деталі повинна бути повністю покрита слідами-вм'ятинами.

Експозиція складає 0,5 – 2 хв. на обробляємо поверхню. Встановлений для визначеної деталі режим дробоструменевої обробки контролюється по прогину тонких сталевих пластинок, які підлягають однобічній дробоструменевої обробці разом із деталями, які підлягають зміцненню. Діапазон твердості деталей, які підлягають дробоструменевому зміцненню, практично не обмежений.

Чеканка спеціальними бійками виконується ударною дією на поверхню, яка зміцнюється. З успіхом застосовується ручний пневматичний наклеп для крупних зварних конструкцій. Ефективність такого наклепу для підвищення стомлюючої міцності досягає значних меж. [4]

Наступним кроком використання методу чеканки являється використання пневмомолоту для верстатного наклепу тіл обертання. Пневматичний ударний інструмент закріплюється в різцетримачі супорта токарного верстату та наносить упорядковані удари по поверхні, яка

обертається з відповідною швидкістю деталі. Супорт верстату при цьому переміщується вздовж вісі виробу самохідним гвинтом.

На сьогоднішній час запропоновано конструкції пружинних ударників, які працюють від кулачкового валику. Ці механічні чеканочні пристосування застосовуються для зміцнення циліндричних і плоских поверхонь. Здійснення поверхневого наклепу крупних деталей на глибину до 35 мм розроблені та впровадженні в промисловості чеканочні пристосування з вібраційним роликком.

Обробка вібруючим роликком і чеканка інструментом ударної дії виконуються переважно для крупних деталей, де вимагається отримати значну глибину наклепу. Гідроабразивний наклеп здійснюється одночасно з гідрополіруванням поверхні. Струмінь рідини, який має абразиви, під тиском направляється на поверхню що оброблюється. Конструкції установок для гідроабразивної обробки за способом подачі рідини можна розділити на дві групи: подача рідини самотіччю або засмоктування її стиснутим повітрям; подача рідини до форсунок під тиском насоса. Гідроабразивні методи обробки застосовуються у тих випадках, коли можна обмежитися невеликою глибиною наклепаного шару і отримати високу шорсткість поверхні.

Безабразивна ультразвукова фінішна обробка. Суть методу заключається в тому, що частота електричного струму перетворюється із 50 Гц в 22 кГц завдяки перетворювачу частоти електричного струму, а потім електричні коливання перетворюються в механічні і передаються на робочий орган, який здійснює наклеп.

Розглянемо деякі елементи технології. Випромінювач ультразвуку підтискається із визначеним тиском до поверхні деталі. Вступаючи у взаємодію з деталлю, що оброблюється, ультразвук пластично деформує її поверхню, згладжує вершини мікронерівностей та зміцнює поверхневий шар. Один фінішний прохід випромінювача ультразвуку при вихідній поверхні  $R_a = 6,3$  мкм дає поверхню  $R_a = 0,1$  мкм (10 клас). Цим методом обробляється

більшість відомих марок сталі, алюміній, мідь та їх сплави, латунь, бронза та інші кольорові метали та їх сплави.

### **1.3 Значення відновлення зношених отворів для ресурсозбереження в агроінженерії**

Розвиток агропромислового комплексу держави, виділення в ньому сфери, яка охоплює фондovиробничі галузі, перехід на оптову торгівлю засобами виробництва посилює увагу до проблем раціонального використання виробничого потенціалу сільського господарства, своєчасного та ефективного ремонту сільськогосподарської техніки в відповідності із вимогами науково-технічного прогресу. В період переходу до економічних методів управління всі різноманітні технічні проблеми можуть бути вірно обгрунтовано вирішені лише із обліком економічних результатів їх реалізації. Виходячи із задач, які стоять перед сільським господарством, інженерна служба повинна в першу чергу організовувати технічний сервіс та ремонт, який сприяє ефективному використанню всієї техніки, що в свою чергу сприяє збільшенню виробництва сільськогосподарської продукції із мінімально можливими витратами.

Техніко-економічний аналіз виробничої діяльності ремонтного підприємства показує, що шляхи підвищення рентабельності ремонтного виробництва є. Одним із них є впровадження нової, більш продуктивної техніки, нових технологій ремонту машин та наукової організації праці.

Важливим резервом підвищення ефективності використання техніки, економії матеріальних, паливо-енергетичних і трудових ресурсів являється відновлення зношених деталей, тобто комплекс операцій по відновленню справного або працездатного стану деталі і її технічного ресурсу.

Економічна доцільність відновлення деталей обумовлена передусім можливістю повторного і неодноразового використання 65 - 75% деталей. Собівартість відновлених деталей не перевищує 75% вартості нових, а витрати матеріалів у 15 – 20 раз нижчі, ніж на їх виготовлення.

Разом з тим ресурс деталей після відновлення складає в середньому не більше 60 - 80% ресурсу нових деталей. Низька якість відновлених деталей обумовлена дефектами просторової геометрії корпусних і базових деталей, застосування способів відновлення, які не забезпечують необхідну зносостійкість, втомлювану стійкість деталей. [7]

Підвищення якості відновлюваних деталей є великою комплексною проблемою, яка вимагає багатостороннього системного аналізу. Тому дослідження направлені на розробку технології для підвищення довговічності отворів деталей методом поверхневої пластичної деформації, а також оптимізацію режимів обкатування як такі, що є найбільш важливими у процесі поверхневої пластичної деформації з точки зору складності та важливості впливу їх на кінцеві результати ефективності виробництва, є актуальними.

#### **1.4 Формулювання задач досліджень**

Головною метою кваліфікаційної роботи є підвищення експлуатаційної довговічності та якості відновлення отворів деталей типу «втулка» та «гільза» шляхом розробки та обґрунтування технології розкатування зі стабілізацією робочого зусилля. Це дозволить нівелювати негативний вплив похибок попередньої обробки та биття інструменту на формування мікрорельєфу поверхні, що є критично важливим для умов ремонтного виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні задачі:

1. Провести аналіз існуючих технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин та обґрунтувати доцільність застосування роликового розкатування зі стабілізованим зусиллям для відновлення зношених отворів.

2. Виконати теоретичні дослідження процесу контактної взаємодії ролика з поверхнею деталі та встановити аналітичні залежності для

визначення оптимальних режимів обробки, які забезпечують необхідні параметри зміцненого шару.

3. Дослідити механізм виникнення хвилястості на обробленій поверхні внаслідок радіального биття інструменту та розробити методи її усунення через конструктивні рішення розкатного пристрою.

4. Розробити та експериментально перевірити нову конструкцію розкатника з пружним елементом та опорами кочення, що забезпечує стабілізацію зусилля деформування.

5. Провести експериментальні дослідження впливу режимів розкатування (зусилля, подачі, швидкості) на шорсткість, мікротвердість та геометричну точність відновлених отворів.

6. Розробити комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності для забезпечення безпечних умов впровадження запропонованої технології на виробництві.

7. Здійснити техніко-економічне обґрунтування ефективності впровадження розробленої технології розкатування отворів у практику ремонту сільськогосподарської техніки.

## 2 НАУКОВІ ЗАСАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОБКАТУВАННЯМ

### 2.1 Вплив поверхневого пластичного деформування на зносостійкість деталей

В ряді з забезпеченням високої якості поверхні поверхневої пластичної деформації в багатьох випадках дозволяє механізувати ручний труд та підвищити продуктивність на кінцевих операціях. Збільшення твердості і міцності металу поверхневим наклепом, а також ріст опорної поверхні при обкатуванні роликками дозволяють розглядати його як один з ефективних способів підвищення працездатності і, зокрема, зносостійкості деталей машин.

При терті зі змащенням велике значення має здатність третьових поверхонь зберігати під навантаженням масляну плівку, що запобігає виникненню осередків безпосереднього контакту металевих поверхонь. Результати досліджень показують, що обкатані поверхні володіють підвищеною несучою здатністю. Навантаження заїдання обкатаних сталевих і чавунних роликів у парі зі сталевими обоймами в середньому на 20% вище, ніж шліфованих. У випадку перенаклепу поверхні деталі її знос зростає.

Вивчення стану поверхневого шару загартованих зразків показало його структурну неоднорідність. Остання, зокрема, характеризується великим розкидом мікротвердості і є наслідком дефектів шліфування. У результаті обкатування розкид твердості значно скорочується, що свідчить про створення обкатуванням більш однорідного (у структурному відношенні) поверхневого шару. Цю обставину варто вважати одним з основних факторів підвищення зносостійкості. [8]

Іспити зразків з легованої сталі 5XB2C в парі з обоймою зі сталі P18 на машині тертя марки МИ при тиску 5,0 МПа зі змащенням показали підвищення зносостійкості в результаті обкатування. Оптимальним, з погляду зносостійкості, виявилася сила 2,0 кН (при діаметрі ролика 50 мм і його

профільному радіусі 8 мм). Підвищення зносостійкості порозумівається більш високою структурною однорідністю і наявністю залишкових напружень стискання, утворених при обкатуванні.

Дослідження зносостійкості направляючих блоків штампів зі сталі ШХ15, термічно оброблених до твердості 62 - 64, проведено при зворотно-поступальному переміщенні з частотою 230 хід/хв. Знос направляючих, зміцненим обкатуванням віброуючою кулькою (з частотою 18 - 24 кГц) у порівнянні із зносом шліфованих, знижується в 2 - 4,7 рази.

Таким чином, обкатування третьових поверхонь деталей з м'яких і загартованих сталей у більшості випадків варто вважати надійним засобом підвищення зносостійкості. Обкатування не є ефективною для деталей, що працюють при сухому терті з великими швидкостями і високим тиском.

Для тертя кочення найбільш характерний осповидний знос, що виражається в поверхневому викрашуванні часток металу. Питання про вплив попереднього зміцнення на цей вид зносу вивчений недостатньо.

У зразків з високовуглицевої бандажної сталі (0,82% С) у результаті обкатування роликом із силою 1,0 кН зносостійкість зменшується в два рази в порівнянні з необкатаними зразками. В інших випадках попередній наклеп зразків з цементованих сталей 18Х2Н4ВА і 12Х2Н4А практично не змінив контактної витривалості. Автори вважають, що при терті кочення в поверхневих шарах деталей виникають ті ж явища, що і при обкатуванні роликами. Відбувається накладення тих самих процесів, що в кінцевому рахунку приводить до великих напружень, відшаровуванню поверхневих шарів та викрашуванню. Тому вони не рекомендують застосовувати наклеп при осповидному зносі. Однак іспити при коченні кульок за зразком зі швидкістю 2 м/сек з максимальною робочою напругою  $\sigma_{\max} = 45$  МПа під час відсутності змащення дали результати, протилежні розглянутим вище. По висновку В.К. Лазаренко і Г.А. Прейс у зразків зі сталей 45, 37ХН3А, 20Х, 40Х, 12ХН3А і ШХ15, які піддавалися дробеструменевому наклепу, відносна зносостійкість зростає від 25 до 116%. [9, 10]

При випробуванні шліфованих та обкатаних зразків зі сталі 9Х, загартованих СВЧ обкатування здійснювалося роликом із профільним радіусом 4,5 мм із силою втискання від 0,5 до 4,0 кН. Найбільша стійкість, у 2,5 рази вище шліфованих, встановлена в зразків, обкатаних із силою 2,0 кН. Цій силі відповідало і найбільше збільшення твердості. Збільшення зносостійкості пов'язане з підвищенням структурної однорідності поверхневого шару і наявністю в ньому напружень стискання. Була випробувана також партія обкатаних роликом валків 12-валкового стану. Обкатані валки при прокатці латуні виявилися на 38% довговічніше шліфованих.

Іспиту на зношування при терті кочення проводили на машині типу МІ-1М. Досліджували зразки зі сталей 14Х2НЗМА і ШХ15, що мали діаметр 40 мм і ширину 10 мм. Верхні зразки, називані надалі роликами, були виготовлені в ідентичних умовах з тих же матеріалів. У нижніх зразків, виготовлених при різних режимах, був неоднаковий поверхневий шар.

Зразки зі сталі 14Х2НЗМА після цементації і термічної обробки шліфували. Частина зразків випробувалася безпосередньо після шліфування, а інші перед іспитом обкатувалися при різному тиску. Твердість зразків перед обкатуванням складала HRC 58 - 59.

Зразки зі сталі ШХ15 (HRC 61 - 62) після загартування і відпуску обробляли по трьох варіантах: піддавали шліфуванню, шліфуванню з наступним поліруванням і шліфуванню з наступним обкатуванням кулькою діаметром 10 мм.

При іспитах навантаження нижнього зразка 2 (рис. 2.1) здійснювалося притисненням до нього ролика 1 за допомогою тарованої пружини 3. Після навантаження контактний тиск складало 85 МПа. Під час зношування зразок обертався зі швидкістю 416 об/хв.

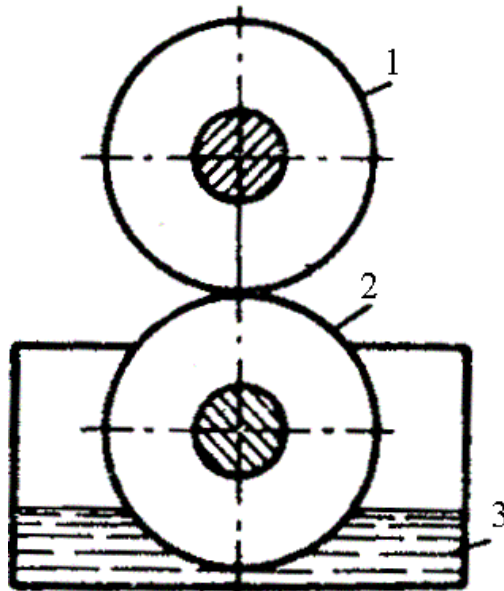


Рисунок 2.1 - Схема іспитів на зношування при терті кочення

Зносостійкість зразків оцінювали кількістю зношеного металу, шляхом зважування зразків на аналітичних вагах. Досліджуваний зразок занурювали у ванночку 3 з машиним маслом. Тривалість іспитів зразків зі сталі ШХ15 складала 32 год, а із сталі 14Х2НЗМА - 8 год (табл. 2.1). Найбільший знос одержали шліфовані зразки, тобто зразки, оброблені по застосовуваній на заводах технології. У зразків, обкатаних після шліфування, знос знизився на 32 - 57%. Підвищення тиску при обкатуванні до оптимальної величини забезпечує більш високу зносостійкість. Так, у зразків зі сталі 14Х2НЗМА, обкатаних при тиску 150 МПа, знос у порівнянні зі шліфованими знизився на 32%, а в обкатаних при тиску 280 МПа - на 51%. [11]

Найбільшу зносостійкість показали зразки, обкатані при тиску 0,2 кН/мм<sup>2</sup>. Збільшення тиску до 300 МПа вже приводить до деякого зниження ефективності обкатування. Очевидно, це пов'язано з перенаклепом, наслідком якого є деяке зниження твердості поверхні і залишкових напруг стискання

Необхідно підкреслити, що розкидання мікротвердості обкатаних зразків незначний у порівнянні з розкиданням мікротвердості шліфованих зразків.

Таблиця 2.1 - Результати випробувань зразків зі сталей 14X2H3МА і ШХ15 при терті кочення

Марка сталі	Поверхня зразка	Тиск при обкатці в МПа	Величина зносу в %
14X2H3МА	Теж саме	-	100
		150	68
		230	59
		280	49
		300	56
ШХ15	Шліфована	-	100
	Шліфована і полірована	-	85
	Шліфована і обкатана	230	54
	Теж саме	280	43

Різка підвищення зносостійкості зміцнених зразків зі сталі ШХ15 (HRC 64 - 67) встановлено також у дослідженні. Зразки були обкатані кулькою, що вібриє з ультразвуковою частотою. Зношування здійснювався за допомогою качання кульки діаметром 10 мм при наявності змащення й оцінювався по розмірі канавки, що утвориться. Кількість циклів при всіх іспитах складало  $10^5$ , контактне зусилля 0,35 кН. Результати іспитів показали зростання відносної зносостійкості в обкатаних зразків у порівнянні зі зносостійкістю шліфованих зразків у 1,6 - 4,6 рази.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що при оптимальних режимах обробки, що відповідають умовам навантаження зразків при випробуваннях, обкатка кульками або роликami підвищує зносостійкість загартованих сталей.

При терті кочення відбувається поступове накопичення мікропластичних деформацій. Як під час обкатки, цей процес очевидно, пов'язаний із викривленням кристалічної решітки та дробленням блоків. Але під час контактних навантажень, що багаторазово повторюються здатність решітки деформуватися являється вичерпаною, очевидно, при значно меньшому тиску у порівнянні з обкатуванням за один прохід. Можна уявити,

що після того, як мікрвикривлення досягнули свого граничного значення, що продовжуються циклічні контактні навантаження викликають у найбільш деформованому тонкому шарі подальше інтенсивне дроблення блоків, що призводять до виникнення втомлених тріщин і поверхневого викришення сказане підтвержується явищем перенаклепа (шолушіння), спостереження при обкатуванні з великим числом проходів при тисці який набагато нижче оптимального. [12]

## **2.2 Конструкції пристроїв для розкатування отворів**

Завдяки відсутності вбудованих підшипників і матеріальних осей обертання роликів, вживані в пристроях планетарного типу, можуть мати вельми малі діаметральні розміри, що дозволяє створювати високопродуктивні пристрої з великою кількістю робочих роликів, що працюють при невеликій силі. Планетарними пристроями успішно обкатують вали і площини, але особливе значення має їх застосування для розкочування отворів.

Низька продуктивність кулькових пристроїв, обумовлена малим радіусом кривизни кульок, частково компенсується паралельною роботою 6 - 12 кульок, завдяки чому збільшується подача. Кульки жорсткої регулюючої головки зібрані в сепараторові і котяться по конічній поверхні опорного кільця між двома наполегливими підшипниками, що фіксують їх положення у напрямі осі отворів. Підшипники, встановлені в загальній обоймі, можуть зміщуватися уздовж осі головки.

Головка настроюється на необхідний діаметр за рахунок фіксації подовжнього положення обойми з кульками щодо конічної опори. Після закінчення робочого проходу головка вільно виводиться з отвору, що розкотив. При цьому корпус випереджає обойму, а кульки скачуються до меншого діаметру конічної поверхні опорного кільця.

Жорсткий контакт кульок з розкочуваною деталлю при використанні головок такої конструкції примушує пред'являти підвищені вимоги до точності отворів, підготовлених під розкочування. Навіть невеликі коливання натягу викликають різкі скачки сили і кута втискування кульок. В результаті якість поверхні погіршується за рахунок того, що неповного зім'яло мікронерівностей або утворення хвилястості. Допустимий натяг при цьому великою мірою залежить від жорсткості розкочуваних деталей.

Кульки цієї головки спираються на два конічні кільця, створюючих кільцевий жолоб. Під дією пневматичного силового механізму кільця зближуються і притискують кульки до розкочуваної поверхні. [8]

Співвідношенням зони деформації при обкатуванні їх роликami з габаритними розмірами оброблюваної деталі визначається можливість уточнення її розмірів і форми в мікро об'ємі. У індивідуальному і дрібносерійному виробництвах доцільно, як правило, суміщати переходи обкачування і чистової обробки різанням в одній фінішній операції. При цьому різанням забезпечують необхідну точність оброблюваної поверхні, а обкатуванням – необхідну шорсткість і необхідний ступінь зміцнення поверхневого шару. В окремих випадках доцільно обкачувати шліфовані поверхні. При цьому обкачування виносять в окрему операцію. Величини припусків під обкачування жорстких деталей вказані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Зменшення (збільшення) діаметрів валів (отворів) при обкатуванні

Спосіб обробки під обкатуванням	Шорсткість поверхні, підготовленої під обкатування, мкм	Зміна діаметру після обкатування, мм
Точіння і розточування	$Rz = 40$	0,03 – 0,06
	$Rz = 20$	0,02 – 0,04
	$Ra = 2,5$	0,01 – 0,02
Шліфування	$Rz = 20$	0,01 – 0,03
	$Ra = 2,5$	0,005 – 0,015
Точіння широким різцем	$Rz = 20$ $Ra = 2,5$	0,01 – 0,02 до 0,01

Ці величини залежать, головним чином, від шорсткості обкатуваної поверхні і частково від способу її підготовки. Якщо допуск обкатуваної поверхні по величині порівняний з очікуваною зміною діаметру або менше за нього, деталь повинна бути підготовлена під обкачування із заданим допуском, але із зміненним на величину зменшення номінального розміру в процесі обкачування в плюс для валів і в мінус для отворів. Практично це означає, що діаметри до 250 мм 8-го квалітету ISO і всі діаметри 7-го квалітету ISO необхідно коректувати. Деталі 8-го квалітету ISO з діаметром більше 250 мм, а також менш точні деталі всіх розмірів обкачують після виготовлення їх за остаточними креслярськими розмірами. В процесі обкачування за рахунок поступового збільшення робочого зусилля діаметр доводиться до граничних розмірів вимагається квалітету точності. Початкова шорсткість поверхні може бути зменшена лише до певних меж, до заповнення мікро западини металом. Заповнені мікрозападини звичайно можна взнати по невеликих не закатаним поглибленнях. При обробці відстань між сусідніми западинами рівне осьовій подачі різця, не змінюється. Це указує на те, що метал переміщується головним чином в об'ємах мікроставувань в радіальному і осьовому напрямках. У осьовому напрямі метал гребінців звичайно перерозподіляється симетрично в обидві сторони. [12]

З практики експлуатації деформуючого інструменту для різних випадків обробки видно, що процес поверхневої пластинчастої деформації багато в чому залежить від способу і шорсткості заздалегідь обробленої поверхні. Форма і взаємне розташування мікро нерівностей, що пластично деформуються, повинні бути по можливості незмінними і рівномірно чергуватися на оброблюваній поверхні. Для поверхонь обертання кращим видом попередньої обробки є точіння, після якого максимальна висота мікро нерівностей не перевищує 25-35 мкм. Процес пластичної деформації бажано вести так, щоб залишкові деформації відбувалися за рахунок зменшення висоти початкових мікро нерівностей.

До найпрогресивнішого технологічного процесу отримання точних отворів з низькою шорсткістю поверхні відноситься розкочування втулок планетарними роликівими головками (рис. 2.2).

Найбільше застосування в практиці отримали планетарні багатороликові пристрої з конічними роликами, що спираються на конічний сердечник.

На рис. 2.2 приведений ряд конструкцій жорстких головок цього типу для розкочування отворів різних діаметрів. Всі конструкції діють поодиноці і тому ж принципу: робочі ролики котяться з натягом між поверхнею розкочуваного отвору і опорним конусом, що сприймає реактивну силу. Положення роликів в процесі роботи фіксується сепаратором трубчастої форми з вікнами, рівномірно розташованими по колу. Необхідний задній кут втискування роликів визначається співвідношенням конусності роликів і опорного конуса.

Діаметральний розмір головок регулюється в межах декількох десятків доль міліметра переміщенням сепаратора з роликами уздовж опорного конуса. Положення наполегливого підшипника, відповідне заданому діаметру, фіксується гайками на різьбленні облямовування. При зрушенні сепаратора вперед діаметр головки по роликах зменшується. [6, 10]

У конструкціях, приведених на рис. 2.2 в і г, застосовані гвинтові пружини, що підтягають з невеликою силою сепаратора до упору в підшипник для відновлення діаметрального розміру головок, що полегшує їх використання на верстатах з вертикальною віссю шпінделя. При установці роликів в сепараторі під невеликим кутом до його створюючої кругова траєкторія роликів перетворюється на гвинтову. Кут установки роликів визначиться із співвідношення необхідної подачі і обкатуваного діаметру.

При розкочуванні з такою подачею ролики котяться по деталі без прослизання у напрямі осі. Проте поворот роликів на кут  $\alpha$  приводить до того, що вони прослизають за час кожного обороту деталі уздовж сердечника на відстань, рівну подачі  $S$ . Ковзання викликає силу тертя, що тягне сердечник у напрямі подачі і що притискує сепаратора до наполегливого підшипника.

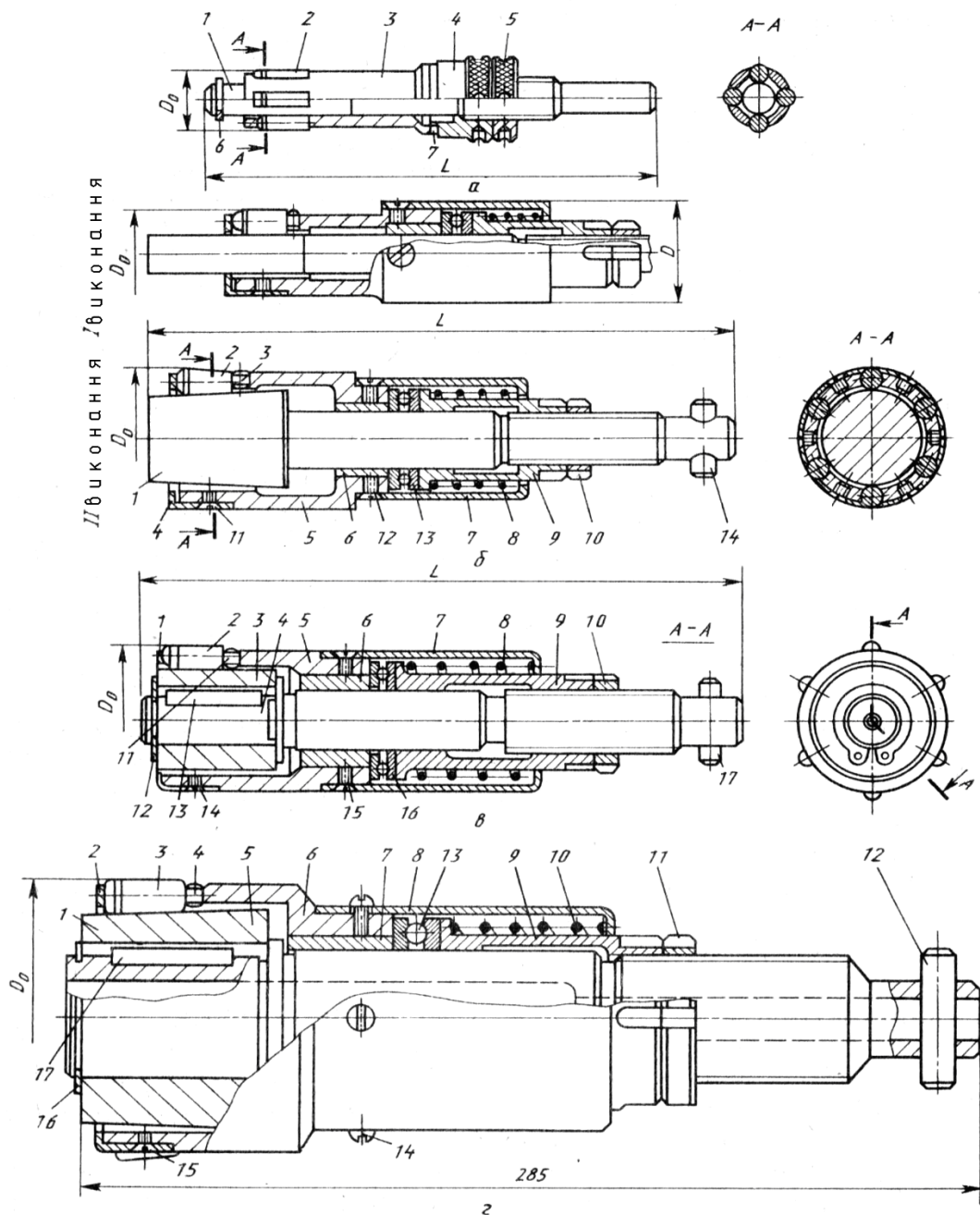


Рисунок 2.2 - Нормалізовані розкатники для обробки отворів діаметром:

- а - 6 - 20 мм; 1 - опірний конус; 2 - ролик; 3 - сепаратор; 4, 5 - гайки;
- б - 21 - 49 мм; 1 - опірний конус; 2 - ролик;
- 3 - розвантажувальний ролик; 4 - кришка; 5 - сепаратор; 6 - втулка; 7 - стакан;
- 8 - пружина; 9, 10 - гайки; 11, 12 - гвинти; 13 - підшипник; 14 - поводок;
- в - 50 - 85 мм; 1 - кришка; 2 - ролик; 3 - опірний конус; 4 - оправка;
- 5 - сепаратор; 6 - втулка; 7 - стакан; 8 - пружина; 9, 10 - гайки;
- 11 - розвантажувальний ролик; 12 - шайба; 13 - шпонка; 14, 15 - гвинти;
- 16 - підшипник; 17 - поводок;
- г - 90 - 100 мм; 1 - оправка; 2 - кришка;
- 3 - ролик; 4 - розвантажувальний ролик; 5 - опірний конус; 6 - сепаратор;
- 7 - втулка; 8 - стакан; 9, 11 - гайки; 10 - пружина; 12 - поводок;
- 13 - підшипники; 14, 15 - гвинти; 16 - шайба; 17 - шпонка

Якщо подача при розкочуванні виявиться менше розрахунковою, ролики можуть зрушити сепаратора вперед і втратити натяг. Для стійкої роботи головок даного типу з урахуванням можливих кутових погрішностей виготовлення гнізд сепараторів подача повинна на 10 - 20% перевищувати розрахункову.

Натяг при обробці деталей планетарними багатороликовими інструментами, тобто різниця діаметрів деталі і головки по роликах, визначає силу обкатки.

Висока радіальна жорсткість системи інструмент - деталь і, як наслідок цього, безпосередня залежність якості поверхні від невеликих змін натягу - серйозний і важко переборний недолік планетарних багатороликових пристроїв. Хоча постійність утла втискування роликів з прямолінійною створюючою створює їм переваги перед кульковими жорсткими головками, необхідність підготовки обкатуваних деталей у вузьких допусках для збереження оптимального натягу служить серйозною перешкодою широкому використанню їх для обробки деталей великого діаметру. [12]

Для розкочування глибоких отворів застосовують дво- або багатороликові пристрої, не передавальні силу обкатки на верстат. На рис. 2.3 показані головки для розкочування глибоких отворів діаметром 60 - 200 мм.

Головка з подовжньо розташованою гвинтовою пружиною (рис. 2.3, а) має низьку жорсткість і широкий діапазон регулювання сили обкатки. Опорні поверхні клину, що розтискає ролики, розташовані під кутом  $30^\circ$  до подовжньої осі головки. Сила стиснення пружини ділиться між двома роликами, але завдяки куту  $30^\circ$  і співвідношенню плечей важелів воно повинне складати лише 0,6 необхідної сили обкатки. Діаметральний розмір пристосування по роликах настраюється на 1 - 2 мм більше, ніж розкочуваний діаметр. При використанні пружини достатньої довжини пристосування такого типу можна застосовувати для розкочування отворів з малою конусністю.

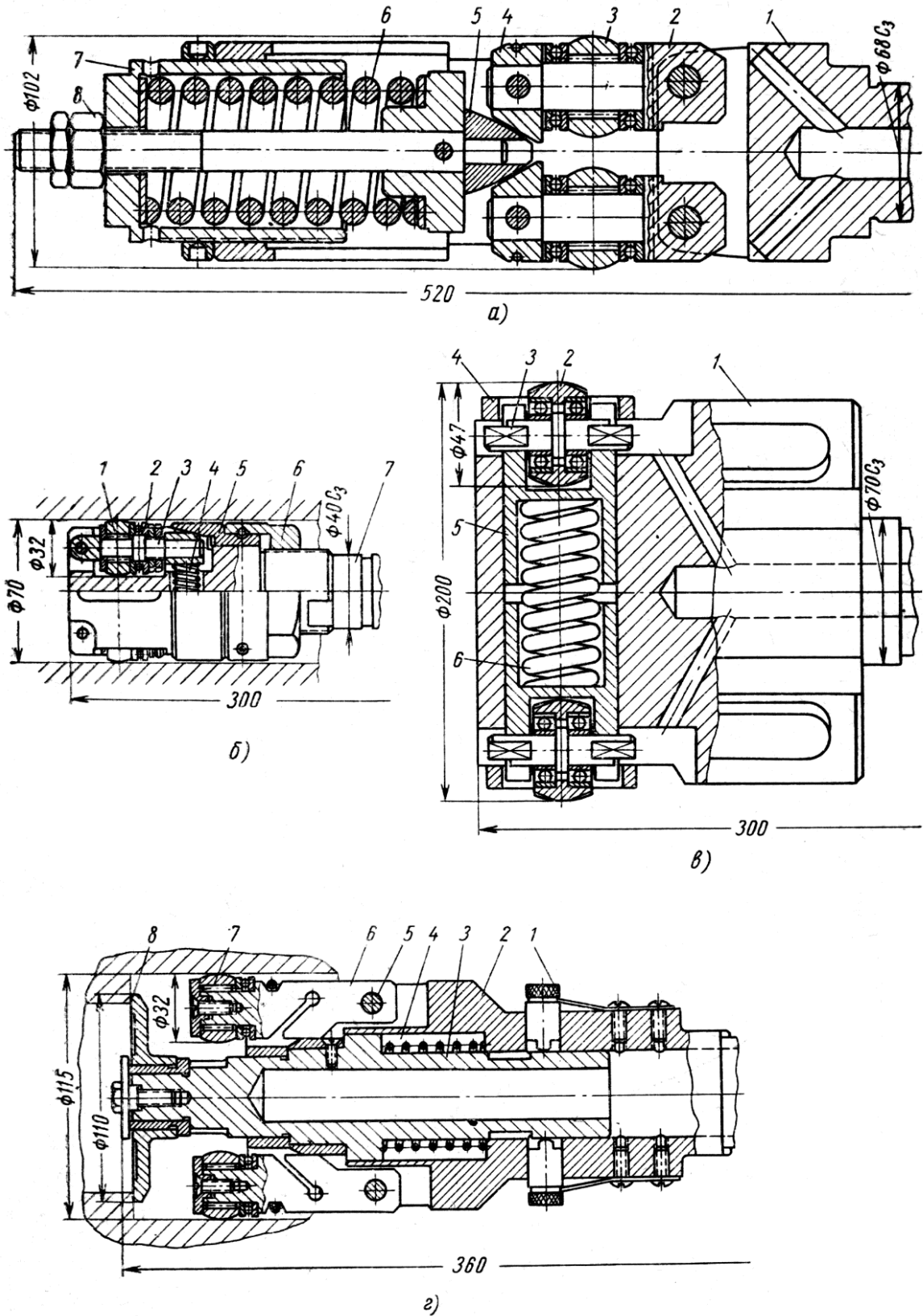


Рисунок 2.3 - Двороликові головки для розтки глибоких отворів

Ролики головки, показаної на рис. 2.3, б, обертаються на важелях, розжатих поперечно розташованою пружиною. Діаметральний розмір головки

по роликах обмежується конічним кільцем, що пересувається по корпусу. На відміну від попередньої конструкції ця головка призначена для розкочування отворів лише в одному напрямі, що визначається постановкою наполегливих підшипників з одного боку роликів.

Звичайне розкочування виконується за один крізний прохід, в кінці якого головка знімається з борштанги. При розкочуванні отворів довжиною до 500 мм на токарних і розточувальних верстатах використовується варіант конструкції таких головок з подовженим облямовуванням і довгою гайкою, що дозволяє стиснути важелі з роликами в кінці проходу. У міру збільшення діаметру розкочуваних отворів пружини вдається розташовувати під роликами на лінії дії сили обкатки.

На рис. 2.3, в показана головка для розкочування глибоких отворів діаметром 200 мм. Під дією пружини її ролики розтискали в поперечному отворі корпусу до упору в оброблювану поверхню. У вільному стані головки осі роликів упираються в обмежувальні фланці.

Сила розкочування у головок (рис. 2.3, б і в) регулюється в невеликих межах мірними шайбами, що змінюють стиснення пружин.

Конструкція головки (рис. 2.3, г) для розкочування глухих або ступінчастих отворів має ролики, що спираються на сердечник, що вільно переміщається уздовж осі. При підході роликів до дна розкочуваного отвору сердечник утоплюється, важелі втрачають опору, зусилля з роликів знімається і головка вільно виводиться з деталі. Втоплений сердечник утримується усередині корпусу клямками, які треба відтягнути, щоб сердечник під дією пружини вийшов в переднє положення і відновив розмір головки по роликах.

Розкочування дуже глибоких отворів (нерідко 6 - 8 м) з довжиною, що перевершує діаметр в 50 разів і більш виконують на верстатах для глибокого свердлення. При цьому головки описаних конструкцій забезпечують дерев'яними або такими, що гумовими направляють, розвантажують ролики від ваги головки і борштанги. Попереднє розточування гільз великої довжини проводять плаваючими пластинами, що дають, як правило, 5 - 6-й клас

шорсткості. Розкочуванням після розточування отримують 7 - 8-й клас шорсткості. Глибокі отвори розкочують з примусовою подачею мастила (сульфофрезола) через борштангу.

Головками, показаними на рисунку 2.3, розкочують різноманітні деталі, зокрема гільзи пневматичних і гідравлічних циліндрів.

### **2.3 Обґрунтування необхідності вдосконалення конструкції розкатника**

Впровадження процесу розкатування в умовах серійного та масового виробництва, як правило, не викликає значних технічних труднощів завдяки можливості застосування високоточного технологічного оснащення та верстатів. Зокрема, для чистової обробки широко використовуються жорсткі багатороликові розкатники (рис. 2.2), які забезпечують високу продуктивність та стабільність розмірів. Проте, ефективна робота таких інструментів можлива лише за умови суворого дотримання вимог до геометричної точності (круглості, циліндричності) та шорсткості отворів на попередніх етапах обробки (розточування або розвертання). Відхилення розмірів або форми заготовки навіть на кілька мікрометрів при використанні жорстких розкатників може призвести до заклинювання інструменту, зриву поверхневого шару або поломки сепаратора. [11]

В умовах ремонтного виробництва, характерного для підприємств агропромислового комплексу, ситуація суттєво відрізняється. Технічний стан відновлюваних деталей часто характеризується значною нерівномірністю припусків, наявністю овальності та конусності зношених поверхонь, а також різномірністю фізико-механічних властивостей матеріалу (наприклад, наявністю «плямистої» твердості внаслідок нерівномірного загартування або зварювання). Використання жорстких розкатників у таких умовах є економічно недоцільним і технологічно ризикованим, оскільки вимагає дороговартісної прецизійної підготовки поверхні, що нівелює переваги методу ППД як фінішної операції.

Для адаптації технології розкатування до реалій ремонтного виробництва доцільно застосовувати інструменти з пружним елементом, який компенсує похибки форми заготовки та забезпечує сталі зусилля деформування. Однак, існуючі конструкції пружних розкатників, що використовують циліндричні пружини, мають суттєвий недолік: вони чутливі до радіального биття робочих роликів. Як показують дослідження, навіть незначне биття профілю ролика у поєднанні з коливаннями зусилля пружини призводить до формування на обробленій поверхні періодичних нерівностей – хвилястості. Це суттєво знижує фактичну площу опорної поверхні та, як наслідок, зносостійкість спряження.

### **Висновки до другого розділу**

Проведений аналіз наукових джерел та результатів експериментальних досліджень підтвердив високу ефективність поверхневого пластичного деформування як методу підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин. Встановлено, що обкатування роликами сприяє формуванню сприятливих залишкових напружень стискання, підвищенню мікротвердості та структурної однорідності поверхневого шару, що в сукупності забезпечує зростання зносостійкості на 30–50% порівняно зі шліфованими поверхнями.

Розглянуто існуючі конструкції інструментів для розкатування отворів, зокрема жорсткі багатороликові головки та пристрої з пружними елементами. Виявлено, що широке застосування жорстких розкатників обмежується високими вимогами до точності попередньої обробки заготовок, що є проблематичним в умовах ремонтного виробництва. Водночас, відомі пружні конструкції не забезпечують стабільної якості обробки при наявності радіального биття інструменту, спричиняючи виникнення хвилястості поверхні.

Обґрунтовано необхідність вдосконалення технології розкатування шляхом розробки нової конструкції пристрою зі стабілізацією зусилля. Такий

підхід дозволить поєднати переваги пружного контакту для компенсації похибок форми відновлюваних деталей з високою точністю та якістю поверхні, характерною для жорсткого інструменту, усунувши при цьому ризик утворення хвилястості та забезпечивши стабільні параметри зміцненого шару.

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛОВИХ КОЛИВАНЬ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПРИ РОЛИКОВІЙ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ**

У більшості випадків експлуатації руйнування деталей машин, устаткування, апаратів і елементів конструкцій починається з поверхні (зношування, втома, контактна взаємодія, вплив середовищ і ін.). Тому в багатьох випадках надійність і довговічність виробів залежить від якості, міцності й структурно-напруженого стану металу поверхневих шарів деталей. При виготовленні й експлуатації деталей машин на їхній поверхнях утворюються нерівності й мікронерівності, а шар металу, що безпосередньо прилягає до поверхні, має нерідко іншу структуру, фазовий і хімічний склад у порівнянні із серцевиною, у ньому, крім того, виникають залишкові напруження. [13]

При відновленні металевих деталей сільськогосподарських машин відповідального призначення їхню довговічність можна підвищити за допомогою поверхневого пластичного деформування (ППД) обкатуванням роликами. Для поліпшення зовнішнього товарного виду й підвищення зносостійкості поверхневого шару застосовується чистове ППД, а з метою підвищення втомної, контактної міцності деталей – зміцнююча обробка.

#### **3.1 Методи зниження нестабільності силових параметрів при розкатуванні**

Для зміцнюючого обкатування металевих виробів великих машин, коли при високому ступені пластичної деформації необхідна й істотна глибина її проникнення, найбільш широко застосовуються сферичні або торообразні ролики й при більших кутах вдавнення ролика в напрямку його подачі на обкачаній поверхні деталі з'являється хвилястість із кроком, відмінним від величини подачі.

Основною причиною появи хвилястості багато дослідників вважають наявність торцевого биття ролика, що приводить до змінної подачі обкатування. Для запобігання появи хвилястості при чистовому обкатуванні рекомендують приймати кут вдавнення, значенням  $2 - 3^\circ$  (що, однак, обмежує шорсткість обкачаної поверхні величиною  $40 < Rz < 160$  мкм), а для зменшення хвилястості – використати ролики з точним робочим профілем і частіше їх перешліфовувати. При зміцнюючому обкатуванні тонкий поверхневий шар для виключення хвилястості поверхні шліфують або сточують, це істотно зменшує ефективність зміцнення. [13]

На рисунку 3.1 показана осцилограма складового зусилля  $P$ , отримана при установці роликового вузла на опорах ковзання, тобто стосовно до конструкції пристроїв, використовуваних на заводах для зміцнюючого або чистового обкатування сталевих деталей.

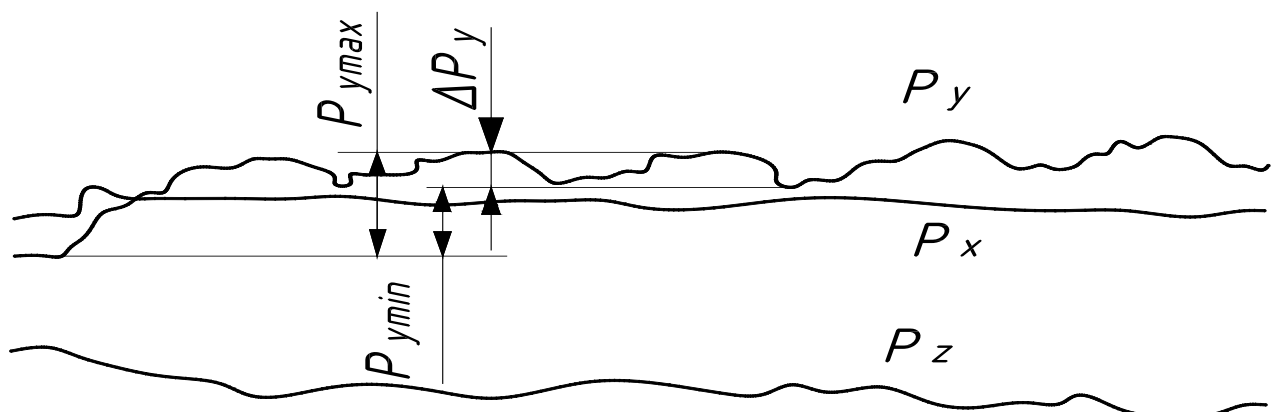


Рисунок 3.1 - Осцилограма складового зусилля  $P$  обкатування:  $P_x$  – дотичне зусилля кочення ролика;  $P_y$  – нормальне зусилля піджиму ролика до деталі;  $P_z$  – зусилля подачі

Номінальне значення зусилля піджиму ролика до деталі,  $P_{yh} = 5$  кН, а співвідношення:  $P_{xn} : P_{yn} : P_{zn} = 0,15:5:1,5$ . Сила  $P_x$  у процесі обкатування залишається практично постійної, а сили  $P_y$  й  $P_z$  з кожним обертом ролика періодично змінюються; амплітуда коливання сили  $P_y$  становить  $\Delta P_y = 0,45$ , а сила  $P_z$  (у напрямку подачі) змінюється менш помітно. При установці

роликового вузла на підшипниках кочення, як показали виміри,  $\Delta P_y < 0,03 P_y$ , а коливання сил  $P_x$  і  $P_y$  практично не виявлені. Коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання становить  $f_c = 0,05 \div 0,1$ , а в підшипниках кочення  $f_k = 0,003 \div 0,008$ , тому стабілізація сили  $P$  при установці роликового вузла на підшипниках кочення досягається істотним зменшенням сил тертя в опорах. Сили тертя в опорах, складаючись із робочим зусиллям пружного елемента обкатаного пристрою, впливають на величину зусилля  $P$  обкатування; при наявності ж радіального биття ролика сили тертя в процесі обкатування стають змінними по величині й напрямку. Це дозволило припустити, що основною причиною появи хвилястості є наявність коливання зусилля  $P$  обкатування при кожному оберті ролика в результаті його радіального биття [14].

Розрахуємо крок хвилі  $S_w$  при некратних відносинах  $D_d/D_p$ , де  $D_d$ ,  $D_p$  відповідно діаметри деталі й ролика. Крапками на розгорненні сліду ролика при коченні його по деталі відзначені місця максимального значення зусилля  $P$  (рис. 3.2).

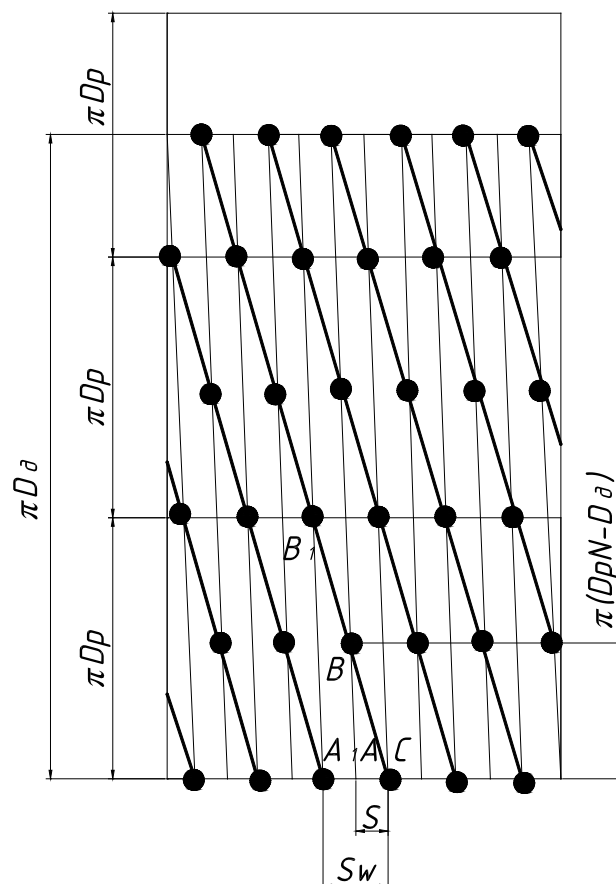


Рисунок 3.2 - Схема розрахунку кроку  $S_w$  хвилі при обкатуванні роликами

Крапки, зрушуючись по поверхні деталі, утворюють гвинтові лінії із кроком  $S_w$ , що перевершує величину  $S$  подачі ролика. Уздовж цих ліній деформація металу поверхневого шару деталі виходить більшою, ніж у проміжках між ними, чим і визначається поява хвилястості.

З подоби трикутників  $ABC$  і  $A_1B_1C$  одержимо

$$S_w = D_p / (D_p - D_\delta), \quad (3.1)$$

де:  $N = D_\delta / D_p + 1$  (тут  $D_\delta / D_p$  - ціла частина відносини).

Дане вираження справедливо для випадку, що виключає проковзування ролика по деталі при їхньому взаємному обертанні, при наявності ковзання фактичний крок хвилі може значно відрізнятись від розрахункового. Розворотом осі ролика навколо перпендикуляра до поверхні контакту в ту або іншу сторону можна змінити ступінь проковзування ролика й тим самим вплинути на величину  $S_w$ .

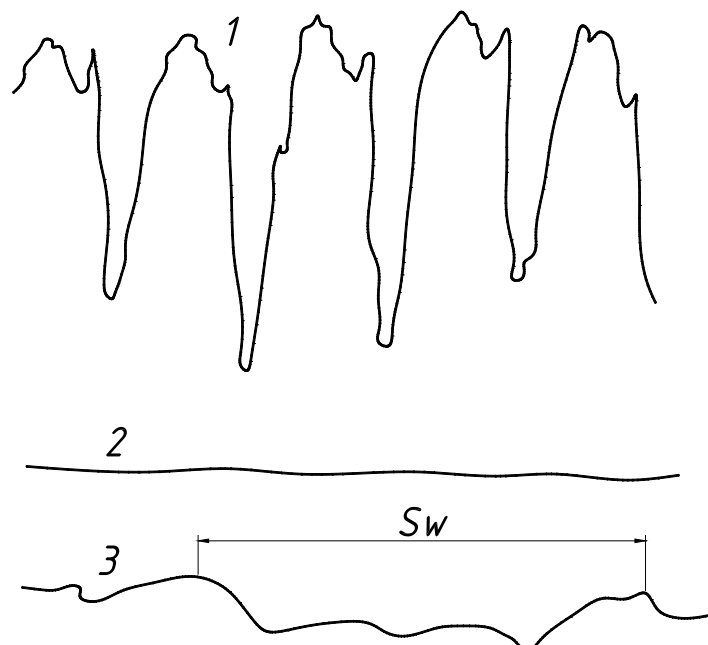


Рисунок 3.3 - Профілограми поверхні вала: 1 – до обкатування ( $Rz = 100$  мкм); 2 – після обкатування при установці роликового вузла на підшипниках кочення ( $Ra = 0,08-0,16$  мкм); 3 – після обкатування при установці роликового вузла на підшипниках ковзання ( $Rz = 16$  мкм)

Стабілізуючи за допомогою установки роликового вузла на підшипниках кочення зусилля  $P$ , можна виключити появу хвилястості при більших кутах вдавнення, які властиві навіть зміцнюючому обкатуванню. При цьому вдається одержати шорсткість поверхні  $Ra = 0,08 - 0,32$  мкм при вихідній  $Rz = 80 - 160$  мкм, і крім того, сполучити чистове й зміцнююче обкатування. Представлені на рис. 3.3. профілограми поверхні вала зі сталі 20, HB140, до обкатування й після обкатування при  $P_y = 5$  кН,  $S = 0,2$  мм/об деталі,  $D_p = 60$  мм, свідчать про ефективність установки роликового вузла на підшипниках кочення. На кривій 3 спостерігається що намітилася хвилястість на обкачаній поверхні із кроком  $S_w = 3,9$  мм, що відповідає значенню  $S_w$ , розрахованому по формулі (3.1). [15]

### 3.2 Вплив геометричних похибок ролика на періодичність мікрорельєфу поверхні

Рівномірність подачі ролика при обкатуванні грає у формуванні поверхні набагато більшу роль, чим рівномірність подачі різця при обробці різанням. Це пов'язане з тим, що метал при обробці не віддаляється, а лише зміщується поблизу місця деформації.

Дискретне переміщення місця деформації в напрямку, перпендикулярному до площини обкатування, приводить до появи нового мікропрофілю, обумовленого взаємодією слідів сусідніх проходів ролика.

Обкачана поверхня зберігає гвинтовий слід подачі ролика. Висота знову створених при цьому нерівностей на ділянці стабільного процесу може бути розрахована геометрично:

$$R_z'' = r_p - \frac{\sqrt{4r_p^2 - s^2}}{2} \quad (3.2)$$

де  $r_p$  – профільний радіус кривизни ролика в мм.

Крок цих нерівностей рівняється подачі ролика. Досвідчена перевірка зв'язку шорсткості з подачею ролика показує, що залежність (3.2) добре дотримується при відносно більших подачах. Результати, отримані при обкатуванні валів зі сталі 20 роликом із профільним радіусом 25 мм, показують, що при подачах більше 0,78 мм/об висота нерівностей збігається з розрахунковою. При менших подачах висота зберігається в межах 2,8 - 3,5 мкм і від подачі не залежить. На відповідних профілограмах видна хвиля із кроком, відмінним від подачі.

У розглянутому випадку висота хвиль не перевищує значення  $R_a=0,63$  мкм. В інших випадках хвилястість при обкатуванні може бути значно більше грубої.

Крок хвилі пов'язаний з подачею й не залежить ні від швидкості, ні від кута вдавнення ролика. Незалежність кроку хвилі від швидкості обкатування й величини деформації (кута вдавнення) і цілком певний зв'язок його з подачею показує, що причина нерівномірності деформації, тобто хвилястості, полягає в кінематиці процесу відносного переміщення деталі й ролика [16].

Розглянемо цей процес докладніше. У міру обертання деталі ролик обертається й подається уздовж осі деталі (рис. 3.4, *a*). При цьому кути повороту ролика  $\Psi$  відповідають кут повороту деталі  $\psi \frac{D_p}{D_o}$  і подача ролика на величину  $s_\psi$ :

$$s_\psi = s \frac{\psi}{2\pi} \cdot \frac{D_p}{D_o} \quad (3.3)$$

Розгорнемо поверхню деталі на площину. У випадку ідеальної схеми контактна канавка постійного профілю шириною  $2a$  розташується на обкачаній поверхні у вигляді сімейства паралельних прямих з постійним кроком, рівним подачі (рис. 3.4, *б*). Для реальні деталі й ролика схема може істотно спотворитися. Робоча поверхня ролика через погрішності виготовлення й установки може мати деяке осьове биття (рис. 3.4, *a*). Слід ролика на розгорненні оброблюваної поверхні стає криволінійним. [17]

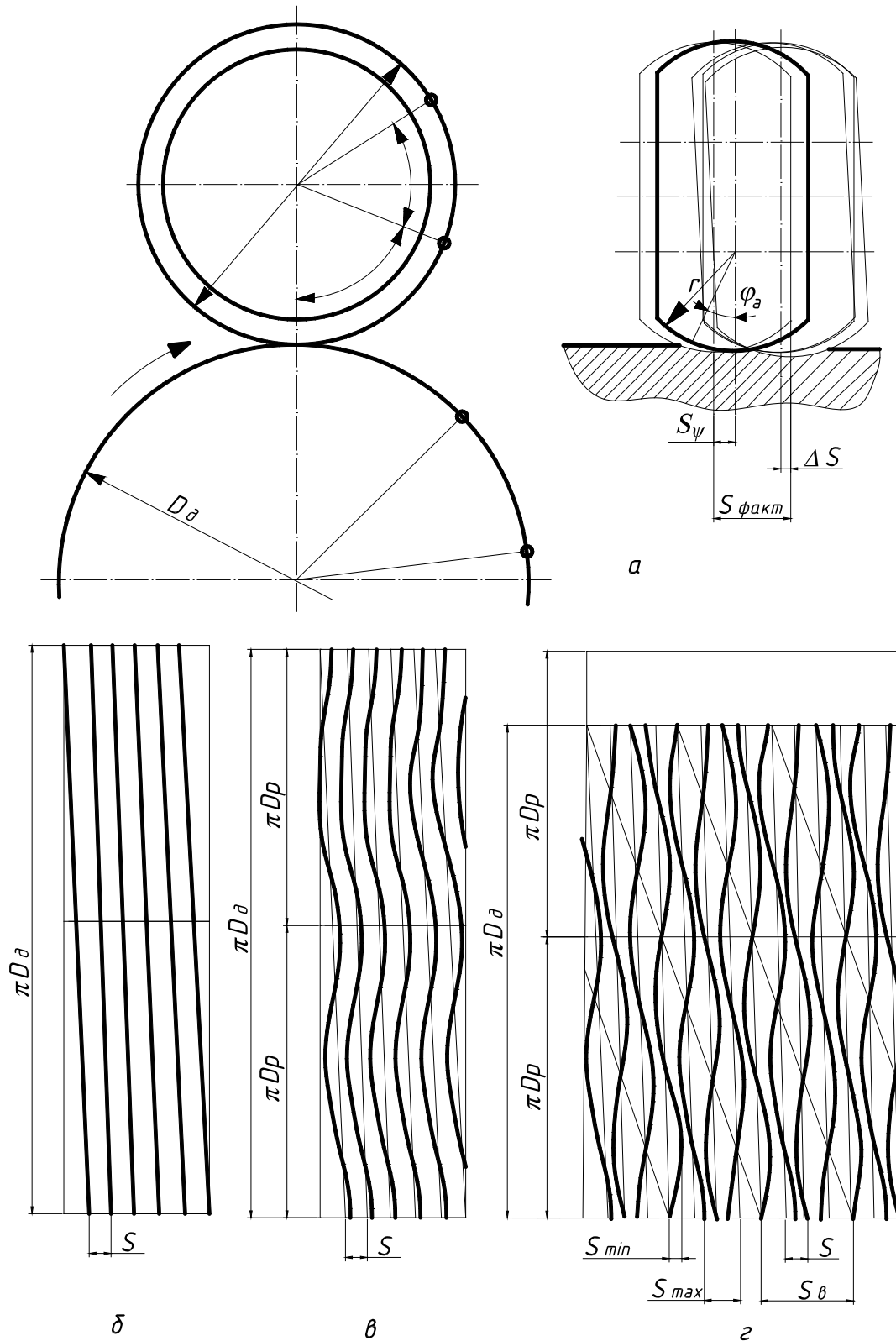


Рисунок 3.4 - Утворення хвилястості поверхні при обкатуванні за рахунок торцевого биття профілю ролика: *a* – перекручування подачі при торцевому битті профілю ролика, *б* – розгорнення поверхні вала, обкачаного роликком, що не має биття профілю, *в* – те ж, роликком з торцевим биттям при кратних діаметрах деталі й ролика, *г* – те ж при некрратних діаметрах деталі й ролика

У результаті биття спотворюється фактична подача ролика:

$$s_{\text{факт}} = s + \Delta s \quad (3.4)$$

Перекручування подачі при розгляді двох суміжних слідів ролика:

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{\delta}{2} \sin \left( \psi_0 + \psi + 2\pi \frac{D_\delta}{D_p} \right) - \frac{\delta}{2} \sin(\psi_0 + \psi) = \\ &= \delta \cos \left( \psi_0 + \psi + \pi \frac{D_\delta}{D_p} \right) \sin \pi \frac{D_\delta}{D_p} \end{aligned} \quad (3.5)$$

У випадку кратності діаметрів деталі й ролика  $\sin \pi \frac{D_\delta}{D_p}$ , а отже, і  $\Delta s$  рівняється нулю, тобто подача залишається постійною, незважаючи на биття ролика (рис. 3.4, в).

В загальному випадку  $\Delta s$  є змінною величиною, що залежить у кожній крапці поверхні від кута повороту ролика  $\Psi$ . Знайдемо кути  $\Psi$ , що відповідають найбільшому й найменшому збільшенням подачі. Для цього дорівнюємо нулю похідну функції  $\Delta s = f(\psi)$ :

$$\Delta s' = -\delta \sin \pi \frac{D_\delta}{D_p} \sin \left( \psi_0 + \psi + \pi \frac{D_\delta}{D_p} \right) = 0 \quad (3.6)$$

Остання рівність задовольняється при

$$\psi_0 + \psi + \pi \frac{D_\delta}{D_p} = \pm \pi n \quad (3.7)$$

звідси

$$\psi = \pi \left( \pm n - \frac{D_\delta}{D_p} \right) - \psi_0 \quad (3.8)$$

Крок хвилі розраховується з подоби трикутників:

$$s_B = \frac{D_p s}{D_p n - D_\partial} \quad (3.9)$$

де  $n$  – кількість заходів – ціле число, найближче до  $D_\partial / D_p$ .

Для зменшення або усунення хвилястості на обкачаній поверхні, що може виникнути за рахунок торцевого биття профілю ролика, при виготовленні ролика робочий профіль його виконують за одну операцію з посадковим отвором ролика, що забезпечує відсутність його торцевого биття.

### Висновки до третього розділу

На основі експериментальних досліджень встановлено, що основною причиною виникнення хвилястості на обробленій поверхні при розкатуванні є періодичні коливання нормального зусилля притискання ролика, спричинені радіальним биттям та значним тертям в опорах ковзання. Аналіз осцилограм підтвердив, що амплітуда коливання сили при використанні опор ковзання є значною, тоді як перехід на опори кочення дозволяє стабілізувати зусилля, зменшуючи коливання до рівня менше 3% від номінального значення, що забезпечує високу рівномірність деформації.

Отримана аналітична залежність для розрахунку кроку хвилі дозволила виявити закономірності формування мікрорельєфу залежно від співвідношення діаметрів деталі та ролика. Доведено, що зміна конструкції роликового вузла із заміною підшипників ковзання на підшипники кочення є ефективним методом усунення хвилястості, що дає можливість застосовувати більші кути вдавнення (до  $5^\circ$ ) для глибокого зміцнення без втрати якості поверхні.

Порівняльний аналіз профілограм показав, що стабілізація зусилля розкатування дозволяє досягти параметра шорсткості  $R_a = 0,08\text{--}0,16$  мкм

навіть при вихідній шорсткості  $Rz = 100$  мкм, поєднуючи ефекти чистової та зміцнюючої обробки. Це підтверджує доцільність використання розробленої методики та модернізованого оснащення для відновлення відповідальних деталей машин, забезпечуючи підвищення їх експлуатаційних характеристик.

## **4 ПРОЄКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ**

### **4.1 Технологічні можливості роликового розкатування при відновленні деталей**

У більшості випадків експлуатації руйнування деталей машин, устаткування, апаратів і елементів конструкцій починається з поверхні (зношування, втома, контактна взаємодія, вплив середовищ і ін.). Тому в багатьох випадках надійність і довговічність виробів залежить від якості, міцності й структурно-напруженого стану металу поверхневих шарів деталей. При виготовленні й експлуатації деталей машин на їхній поверхнях утворюються нерівності й мікронерівності, а шар металу, що безпосередньо прилягає до поверхні, має нерідко іншу структуру, фазовий і хімічний склад у порівнянні із серцевиною, у ньому, крім того, виникають залишкові напруження. [18]

При відновленні металевих деталей сільськогосподарських машин відповідального призначення їхню довговічність можна підвищити за допомогою поверхневого пластичного деформування (ППД) обкатуванням роликками. Для поліпшення зовнішнього товарного виду й підвищення зносостійкості поверхневого шару застосовується чистове ППД, а з метою підвищення втомної, контактної міцності деталей - зміцнююча обробка.

### **4.2 Експлуатаційні та технологічні вимоги до розроблюваного пристрою**

Конструкція пристрою для розкатування отворів зі стабілізацією зусилля обкатування повинен відповідати таким вимогам:

- простота у виготовленні;
- надійність в роботі;
- використовувати деталі тіл обертання;
- пристрій повинен знижувати затрати праці при обкатуванні отворів;

- торцеве биття профілю ролика при установці його на підшипники кочення не повинне перевищувати 0,05 мм;
- величина тертя в опорах кочення ролика після зборки вузла перевіряється обертанням ролика за допомогою металевої пластини, при притисненні її до ролика та переміщенні (ролик повинний легко повертатися на опорах без проковзування);
- відповідати вимогам пожежної і електробезпеки;
- простота і зручність у обслуговуванні;
- швидкість проведення відновлення отворів за допомогою даного пристрою;
- можливість використання при проведенні поточних і капітальних ремонтах;
- не спричиняти шкідливий вплив на оточуюче середовище.

#### **4.3 Опис конструкції та функціонування розкатного інструменту**

Пристрій для розкочування отворів діаметром 115 – 125 мм, в якому роликові вузли встановлені на опори кочення, показано на рис. 4.1. [19]

Він складається з корпусу 1, в пазу якого на осях 2 і опорах кочення 3,4 встановлені важелі 5, на їх циліндрових цапфах встановлені обкатуючі ролики 6. На кінцях важелів 5 закріплені клинові повзуни 7, з пазами пружинного кільця 8. У різьбове розточування корпусу 1 укрупнений стакан 9 і закріплений гайкою 10. У стакан 9 вставлена пружина 11, інший кінець якої встановлений на виточці втулки 12, закріпленою на осі 13. На різьбовій ділянці осі 13 навірена гайка 14, а поряд з втулкою 12 напресований клин 15. Між клином 15 і клиновими повзунами 7 встановлені касети 16 з циліндровими роликами, а між стаканами 9 і віссю 13 – касети 17 і 18. Ролики 6 підібгані до розкочуваної деталі 19. Спеціальним різьбленням на корпусі 1 пристрій укрупчується в борштангу верстата глибокого свердлення.

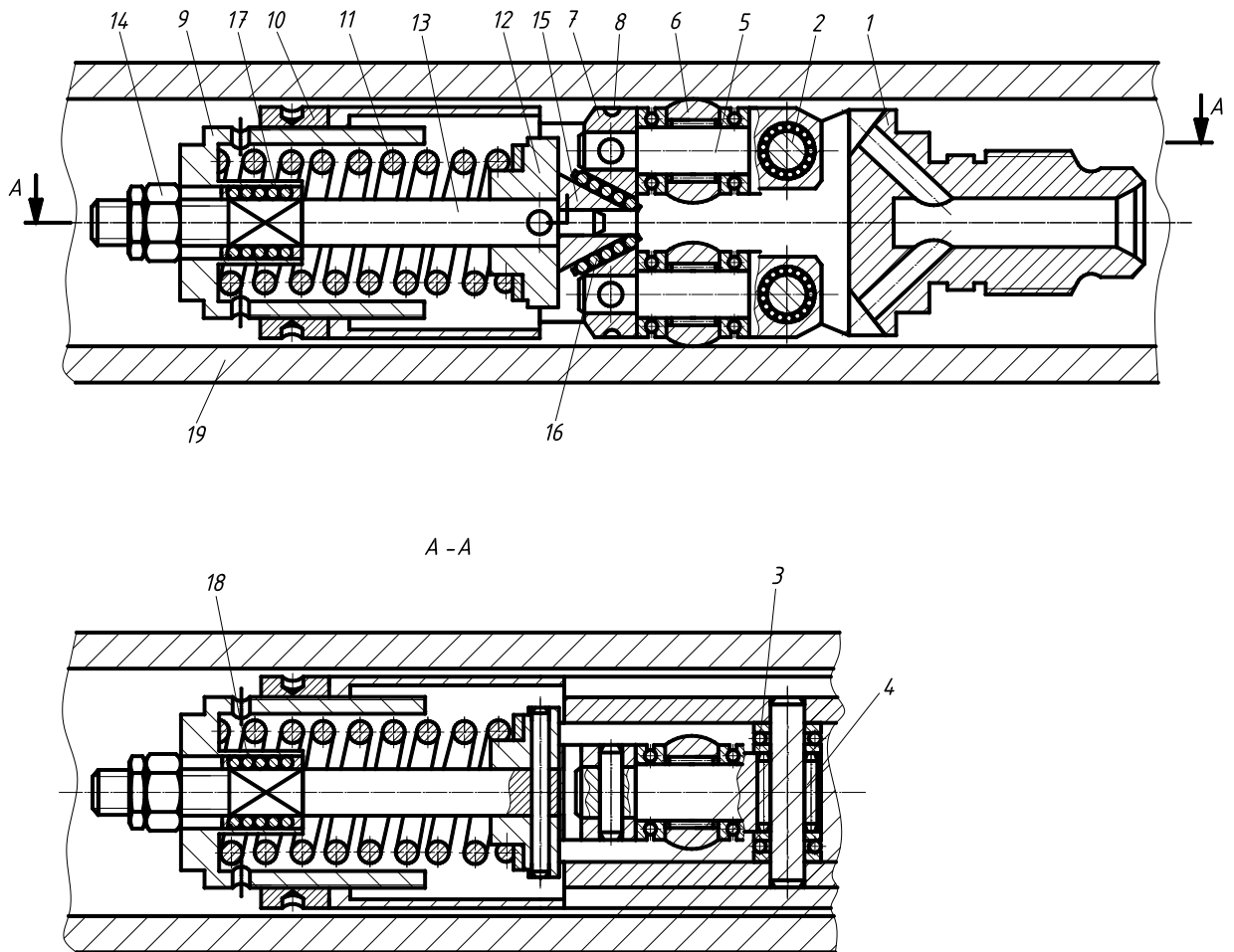


Рисунок 4.1 - Пристрій для чистового і зміцнюючого розкатування роликми глибоких отворів діаметром 115 - 125 мм: 1 – корпус; 2, 13 – вісь; 3, 4 – опори кочення; 5 – важіль; 6 – обкатуючи ролики; 7 – клинові повзуни; 8 - пружинні кільця; 9 – стакан; 10, 14 – гайка; 11 – пружина; 12 – втулка; 15 – клин; 16, 17, 18 – касети; 19 - деталь

Обертанням стакана 9 встановлюється висота пружини 11, яка визначається робочим зусиллям на обкатуючих роликах 6, яке у свою чергу знаходиться по номограмі (рис. 4.2). Діаметр по роликах 6, прийнятий на 2 мм великим діаметру отвору розкочуваної деталі 19, встановлюється обертанням гайки 14. У момент того, що стосується роликів 6 розкочуваної деталі 19 роликів віджимаються від деталі на величину натягу, що забезпечує їх вантаження в процесі радіального биття профілю роликів, таким чином компенсується биття деталі і зміни діаметру її отвору в межах поля допуску по довжині деталі. При цьому за рахунок повороту важелів 5 на опорах кочення

3 і 4 в напрямі від деталі клин 15 разом з втулкою 12 і віссю 13 зрушуються вліво і між торцями втулки 9 і гайки 14 утворюється зазор, що забезпечує передачу зусилля пружини 11 на ролики 6. Після цього включається подача борштангиверстата на кожен оборот деталі і здійснюється процес розкочування отвору.

За рахунок малих сил тертя в опорах кочення 3, 4, 16, 17, 18 коливань зусилля обкатування більш ніж на порядок менше, чим в опорах ковзання, що дозволяє уникнути поява хвилястості на розкочуваній поверхні при великих кутах втискування роликів ( $\varphi = 5^\circ$ ). При цьому досягається параметр шорсткості поверхні  $0,08 < Ra < 0,32$  мкм при початковій  $Rz = 10 - 20$  мкм і здійснюється суміщене чистове і зміцнююче розкочування. Крім того, розкочування довгих тонкостінних труб за допомогою цього пристрою за рахунок стабілізації зусилля розкочування не приводить до викривлення осі отвору.

#### 4.4 Визначення силових та кінематичних параметрів процесу обробки

Для розрахунку основного режиму обкатування - зусилля в контакті ролика з деталлю з урахуванням рівняння Мейера, що зв'язує при вимірі твердості силу вдавнення кульки з діаметром відбитка, застосуємо залежність:

$$P = 4 m D_w^{n-2} \sin^{n-2} \varphi a b, \quad (4.1)$$

де:  $m$  і  $n$  - константи Мейера, що відповідно залежать від діаметра кульки;

$D_w$ , властивостей оброблюваного матеріалу й від здатності матеріалу до наклепу;

$a$  і  $b$  – півосі еліпса контакту ролика з деталлю уздовж осі ролика в напрямку його кочення;

$\varphi$  - середній кут вдавнення ролика в деталь.

$$\varphi = (\varphi_a + \varphi_b) / 2. \quad (4.2)$$

З метою перевірки можливості застосування залежності (4.2) як умова подоби при розрахунку середнього тиску в значно витягнутих відбитках, тобто коли  $a \gg b$ , на пресі Бринеля з різними зусиллями в сталеві зразки вдавлювали кульки, а також бочкообразні, торообразні й циліндричні ролики; по розмірах їхніх відбитків, обмірюваних на інструментальному мікроскопі з точністю 5 мкм, розраховували середній тиск  $P$  у МПа. Це значення, помножене для кругових відбитків на  $10^3$ , є твердістю  $HM$ . Залежність  $HM$  від кута  $\varphi$  (в інтервалі від 2 до 25 градусів) для сталей різної твердості апроксимували залежністю  $HM = \gamma e^{\beta_1 \varphi} \varphi^{\beta_2}$ , де  $e$  – підстава натуральних логарифмів; значення  $\gamma, \beta_1, \beta_2$  наведені нижче:

$HB \dots$	128	176	202	341
$\gamma, \text{нм/град.}$	33,4	56,7	86,7	190,2
$\beta_1, 1/\text{град.}$	-0,0137	-0,0137	-0,017	-0,019
$\beta_2,$	0,53	0,49	0,42	0,21.

Значення  $P$  у МПа, помножене на  $10^3$  для бочкообразних і циліндричних роликів, обчислене при різних кутах, відхиляється від числа  $HM$  не більш, ніж на 7%. Це дозволило при розрахунку зусилля  $P$  по залежності (4.1) для випадку обкатування бочкообразними, торообразними й циліндричними роликами як умова подоби прийняти сталість кута  $\varphi$ . При обкатуванні деталей бочкообразними роликами малого діаметра, що дають витягнуті відбитки й малі кути  $\varphi_a$ , а також торообразними роликами, з установкою роликів на підшипниках кочення, зусилля  $P$ , щоб уникнути лущення обкачаної поверхні в результаті перенаклепу, повинне бути обмежене кутом  $\varphi = 5^\circ$ . При цьому в міру витягування відбитків кут вдавлення в напрямку кочення ролика прагне до  $\varphi_b = 10^\circ$ . [20]

На рисунку 4.2 наведена номограма, побудована по залежності (4.1), для визначення зусилля обкатування деталей зі сталі 20 ( $P_{20}$ ) по заданим профільному радіусі ролика  $r_p$ , його діаметру  $D_p$  і діаметру деталі  $D_d$ .

У лівій частині номограми побудоване сімейство кривих, що представляють собою залежності подвоєного наведеного радіуса кривизни ( $2R_{np}$ ) у площині кочення ролика від діаметра ролика й деталі ( $D_p$  і  $D_d$ ) ( $2R_{np} = \frac{1}{1/D_p \pm 1/D_d}$ ) для оброблюваних поверхонь різної форми. Сімейство кривих розділене прямою  $D_d \rightarrow \infty$ , що ставиться до випадку обробки плоскої поверхні. Криві, розташовані над цією прямою, ставляться до обкатування валів, під нею – до розкочування отворів. У правій частині номограми криві лінії відповідають зусиллям  $P_{20(5)}$  обкатування роликками при установці роликкових вузлів на підшипниках кочення й куті  $\varphi = 5^\circ$ , коли потрібно одержати поверхню з параметром шорсткості  $0,08 < R_a < 0,32$  мкм і сполучити чистове й зміцнююче обкатування. Відрізки прямих, розташовані нижче похилій прямої  $b/a = 0,25$ , відповідають зусиллям  $P_{20(2,5)}$  обкатування з кутом  $\varphi_a = 2,5^\circ$  при установці роликкових вузлів на опорах ковзання. [20]

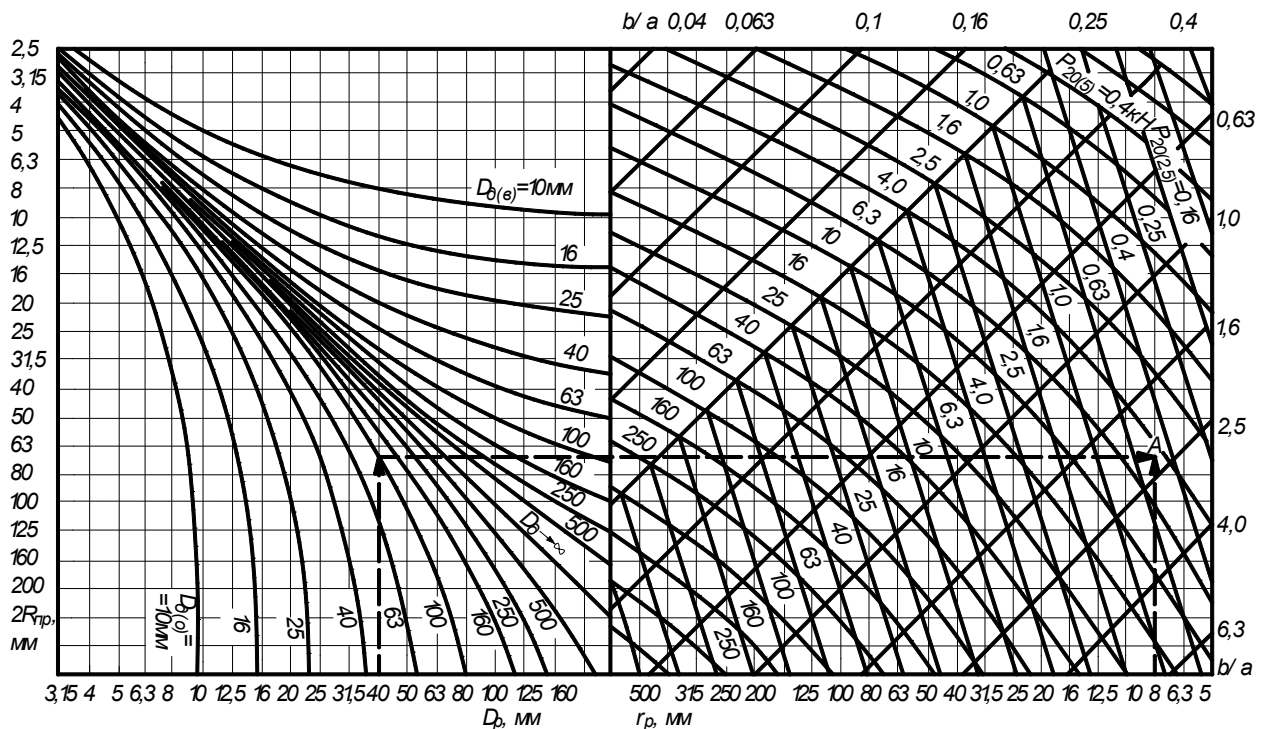


Рисунок 4.2 - Номограма для визначення зусилля обкатування деталей зі сталі 20:  $D_{d(e)}$  – діаметр обкатуємого вала;  $D_{d(o)}$  – діаметр отвору;

$$2R_{np} = 1 / (1/D_p \pm 1/D_d)$$

Похилі прямі  $b/a = 0,25$  визначають форму пластичного відбитка ролика на деталі. При  $b/a < 0,25$  (використання бочкообразних роликів малого діаметра) хвилястість на обкачаній поверхні не з'являється при  $\varphi = 5^0$  і при роботі пристроями з установкою роликів на опорах ковзання, тому що переважно деформація поверхневого шару проявляється в площині кочення ролика; у цьому випадку зусилля обкатування варто вибирати по кривих  $P_{20(5)}$ . При  $b/a > 1$  (застосування тарообразних роликів) є небезпека виникнення хвилястості обкачаної поверхні при зміцнюючому обкатуванні із застосуванням більших кутів вдавнення роликів. У цьому випадку необхідно встановлювати роликові вузли на опори кочення, а при чистовому обкатуванні – обмежувати зусилля  $P_{20}$  кутом  $\varphi_a = 2,5^0$ . [21, 22]

На рисунку 4.2 показаний приклад вибору зусилля  $P_{20}$  для розкочування в сталевій деталі отвору діаметром  $D_d = 100$  мм роликом діаметром  $D_p = 40$  мм, роликом із профільним радіусом  $r_p = 8$  мм. Отримане побудовою рішення (крапка  $A$ ) означає, що у випадку застосування пристрою з роликовим вузлом на опорах ковзання при обмеженні ефекту зміцнення через небезпеку появи хвилястості на обкачаній поверхні зусилля  $P_{20(2,5)} = 0,5$  кН обмежено кутом  $\varphi_a = 2,5^0$ ; у випадку ж застосування пристрою з роликовим вузлом на підшипниках кочення з метою сполучення чистового й зміцнюючого обкатування  $P_{20(5)} = 5$  кН, середній кут вдавнення ролика  $\varphi = 5^0$ . При обкатуванні деталей підвищеної твердості зусилля  $P_{20}$  необхідно помножити на коефіцієнт твердості  $K_P$ , залежно від твердості  $HB$ .

$HB$	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
$K_P$	0,8	1	1,25	1,5	1,7	1,95	2,2	2,45	2,7	3	3,3	3,6	4,0	4,4	4,5.

Подачу  $S$  ролика на кожен оберт деталі вибирають залежно від профільного або приведенного радіусу кривизни ролика, необхідній і початковій шорсткості поверхні (табл. 4.1). Приведений радіус  $r_{np}$  кривизни в осьовому перетині ролика визначають по залежності:

$$1/r_{np} = 1/r_p - 1/r_2, \quad (4.3)$$

де  $r_2$  - радіус галтелі валу або западини канатного блоку.

Таблиця 4.1 - Подача при обкатуванні сталевих деталей роликками кругового профілю,  $S$  мм/об

Профільний ( $r_p$ ) кривизни в осьовому перетині ролика, мм	Необхідна $Ra$ , мкм						
	1,25		0,63		0,16-0,32		
	Початкова $Ra$ , мкм						
	10,0	5,0	2,5	5,0	2,5	2,5	1,25
5	0,07	0,15	0,3	0,07	0,15	0,07	0,15
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24
16	0,23	0,47	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35
32	0,47	0,94	1,00	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,66	0,66	0,48	0,48
63	0,92	1,40	1,40	0,72	0,72	0,54	0,54
80	1,17	1,60	1,60	0,84	0,84	0,60	0,60
100	1,45	1,80	1,80	0,96	0,96	0,66	0,66
125	1,8	2,0	2,0	1,05	1,05	0,75	0,75
160	2,25	2,25	2,25	1,23	1,23	0,85	0,85
200	2,55	2,55	2,55	1,35	1,35	0,95	0,95
250	2,9	2,9	2,9	1,55	1,55	1,1	1,1
320	3,2	3,2	3,2	1,7	1,7	1,2	1,2
400	3,6	3,6	3,6	1,9	1,9	1,4	1,4
500	4,0	4,0	4,0	2,2	2,2	1,55	1,55
630	4,6	4,6	4,6	2,4	2,4	1,7	1,7

## Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі обґрунтовано конструктивне рішення пристрою для розкатування отворів деталей обертання, яке базується на використанні роликів, встановлених на опори кочення. Така конструкція забезпечує стабілізацію зусилля деформування, мінімізує тертя у вузлах і запобігає виникненню хвилястості на обробленій поверхні. Розроблений пристрій дозволяє виконувати як чистове, так і зміцнююче обкатування, забезпечуючи високу точність і якість поверхні ( $Ra\ 0,08\dots0,32\ \mu\text{m}$ ) при відновленні відповідальних деталей сільськогосподарських машин.

Проведено теоретичний розрахунок силових параметрів процесу, що враховує геометрію контакту ролика з деталлю та фізико-механічні властивості матеріалу. Використання залежності Мейера та введення умови подібності за кутом вдавнення дозволило побудувати номограму для оперативного визначення оптимального зусилля розкатування. Це спрощує налаштування режимів обробки залежно від розмірів отвору та твердості деталі, гарантуючи стабільність процесу без ризику перенаклепу поверхневого шару.

Встановлено, що застосування опор кочення у конструкції розкатника є критично важливим для забезпечення довговічності інструменту та якості обробки. Зниження сил тертя дозволяє працювати з більшими кутами вдавнення роликів, що підвищує ефективність зміцнення без погіршення шорсткості. Запропонована методика вибору режимів та конструкція пристрою є універсальними і можуть бути адаптовані для відновлення широкої номенклатури деталей типу «втулка» та «гільза» в умовах ремонтного виробництва.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Аналіз умов праці при розкатуванні отворів деталей обертання

Процес розкатування отворів деталей обертання належить до методів поверхневого пластичного деформування металів і виконується на металорізальних верстатах токарної групи. Даний технологічний процес характеризується специфічними умовами праці, які потребують ретельного аналізу з метою забезпечення безпеки працівників та створення оптимального виробничого середовища. Під час виконання операцій розкатування отворів на робочих місцях виникає комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть негативно впливати на здоров'я та працездатність оператора верстата. [23]

Відповідно до ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», небезпечним виробничим фактором є фактор, вплив якого на працюючого у певних умовах призводить до травми або різкого погіршення здоров'я, а шкідливим виробничим фактором – фактор, що може викликати професійну патологію, тимчасове або стійке зниження працездатності, підвищити частоту соматичних та інфекційних захворювань, призвести до порушення здоров'я потомства. При механічній обробці металів, зокрема при розкатуванні отворів, до основних небезпечних виробничих факторів належать: рухомі частини виробничого обладнання, обертові елементи пристрою для розкатування, пристосування для закріплення оброблюваної деталі, а також сама оброблювана деталь.

Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при виконанні операцій розкатування отворів деталей обертання включають підвищену температуру поверхонь оброблюваних деталей та інструменту внаслідок тертя і пластичної деформації металу, виробничий шум від працюючого обладнання, вібрацію верстата та пристосувань, а також недостатнє освітлення робочої зони. Рівень шуму при роботі токарних верстатів може досягати 75–

85 дБ, що за тривалої дії негативно впливає на слуховий апарат та нервову систему оператора. Вібрація, що виникає під час процесу розкатування, передається через верстат та інструмент на руки працівника і може спричиняти вібраційну хворобу при систематичному впливі.

До хімічних шкідливих виробничих факторів належить вплив мастильно-охолоджувальних рідин (МОР), які застосовуються для зменшення тертя та відведення тепла із зони обробки. Контакт МОР зі шкірою може викликати алергічні реакції, дерматити та інші захворювання шкірних покривів. Випаровування компонентів МОР при нагріванні створює шкідливі аерозолі, що потрапляють у дихальні шляхи працівника та можуть спричиняти захворювання органів дихання. Крім того, при обробці деталей утворюється металевий пил та дрібнодисперсні частинки, що забруднюють повітря робочої зони. [24]

Найбільш поширеними видами травм при роботі на металообробних верстатах є поранення очей, обличчя, рук та забої тіла. Аналіз причин виробничого травматизму в цехах механічної обробки металів свідчить, що основними причинами травмування є відсутність або недосконалість захисних огорожень і запобіжних пристроїв, несправний стан обладнання, інструменту та пристосувань, неправильне розміщення верстатного обладнання, а також неправильні прийоми роботи. При розкатуванні отворів особливу небезпеку становить можливість вильоту оброблюваної деталі або елементів пристрою при їх недостатньому закріпленні, а також травмування рук обертовими частинами при недотриманні правил безпеки.

До факторів трудового процесу, що характеризують тяжкість і напруженість праці при розкатуванні отворів, належать статичні та динамічні фізичні навантаження, пов'язані з установленням і зняттям деталей, утриманням робочої пози протягом зміни, а також нахили корпусу при обслуговуванні верстата. Психофізіологічні фактори включають напруження зору при спостереженні за процесом обробки, монотонність виконуваних операцій та підвищену увагу, необхідну для контролю параметрів процесу.

Тривала робота в умовах впливу зазначених факторів може призводити до перевтоми, зниження продуктивності праці та збільшення ймовірності помилкових дій.

Для створення безпечних умов праці при розкатуванні отворів деталей обертання необхідно забезпечити комплекс організаційних і технічних заходів. Передачі верстатів, що розташовані поза корпусами та становлять небезпеку травмування, повинні мати надійні огорожі. Захисні пристрої не повинні обмежувати технологічних можливостей верстата і викликати незручності при роботі, налагодженні та прибиранні. Кріплення захисних пристроїв має бути надійним і виключати випадки самовідкривання. Поверхні верстатів, захисних пристроїв та органів керування не повинні мати гострих кромek і задирок, які можуть травмувати працюючого. [23]

Важливе значення для забезпечення безпеки праці має дотримання вимог щодо носіння спецодягу та засобів індивідуального захисту. Робочий одяг не повинен мати вільно розвіваючихся частин, рукави мають щільно облягати руку та бути застебнутими, волосся слід прибирати під головний убір. Обов'язковим є використання захисних окулярів для запобігання травмуванню очей металевими частинками та бризками МОР. При роботі необхідно контролювати надійність закріплення оброблюваної деталі та елементів пристрою для розкатування, забороняється проводити вимірювання та торкатися деталі під час обробки.

Мікрокліматичні умови на робочому місці при розкатуванні отворів повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Оптимальна температура повітря в робочій зоні для категорії робіт середньої важкості становить 18–20°C у холодний період року та 21–23°C у теплий період. Відносна вологість повітря має бути в межах 40–60%, швидкість руху повітря – не більше 0,2 м/с у холодний і 0,3 м/с у теплий період року. Освітленість робочої зони повинна забезпечувати можливість чіткого спостереження за процесом обробки та

відповідати нормам, встановленим ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення».

## **5.2 Розробка комплексу організаційних та технічних заходів з охорони праці та пожежної безпеки**

Роботодавець забезпечує розробку і реалізацію:

- плану комплексних заходів, спрямованих на доведення умов і безпеки праці до нормативних вимог, підвищення існуючого рівня охорони праці;
- розділу «Охорона праці» колективного договору;
- оперативних планів робіт з охорони праці служби охорони праці та керівників структурних підрозділів підприємства.

Відповідно Закону України «Про охорону праці» ст. 20. Регулювання охорони у колективному договорі, угоді сторони передбачають забезпечення працівникам соціальних гарантій у галузі охорони праці на рівні, не нижчому за передбачений законодавством, а також комплексні заходи щодо досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, підвищення існуючого рівня охорони праці, запобігання випадкам виробничого травматизму, професійного захворювання, аваріям і пожежам, визначають обсяги та джерела фінансування зазначених заходів. [23]

Заходи щодо досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, підвищення існуючого рівня охорони праці, запобігання випадкам виробничого травматизму, професійного захворювання, аваріям і пожежам (Заходи з охорони праці) розробляють відповідно з законодавчо–нормативними документами Закон України «Про охорону праці», Закон України «Про оподаткування прибутку підприємства», Закон України «Про колективні договори», Постанова Кабінету Міністрів №994, від 27.06.2003 року «Перелік заходів та засобів з охорони праці, витрати на здійснення та придбання яких включаються до валових витрат».

### 5.3 Розрахунок вентиляції

Об'єм повітря, яке необхідно відвести з виробничого відділення розраховуємо за формулою:

$$V = b \cdot l \cdot h_n \cdot k \quad (5.1)$$

де  $b$  – ширина відділення, м;

$l$  – довжина відділення, м;

$h_n$  – висота відділення, м;

$k$  – кратність обміну повітря.

Підставивши числові значення отримаємо:

$$V = 9 \cdot 6 \cdot 4,8 \cdot 3 = 777,6 \text{ (м}^3\text{/год)}.$$

За об'ємом відведеного повітря визначаємо необхідну потужність вентилятора:

$$N = \frac{V \cdot P}{3600 \cdot 10 \cdot 2 \cdot \text{ККД}} \quad (5.2)$$

де  $P$  – тиск, що розвиває вентилятор;

$\text{ККД}$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$N = \frac{777,6 \cdot 10000}{3600 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 0,5} = 216$$

На основі розрахунків вибираємо вентилятор з табл. 5.3.

Таблиця 5.1 Характеристика вентиляторів

Модель	H300M	H318
Габаритні розміри	1120x575x1030	1200x650x110
Маса, кг З електродвигуном в алюмінієвому корпусі	74	–
З електродвигуном в чавунному корпусі	82,5	105

#### **5.4 Система контролю показників безпеки технологічного обладнання**

##### **5.4.1 Карта контролю показників безпеки пристрою для розкатування роликми отворів**

Для запобігання таким подіям, як аварії, травми та катастрофи безпосередньо у господарствах, потрібний доступний, простий і ефективний спосіб їх прогнозування. Для побудови логіко-імітаційного моделювання надзвичайних пригод, необхідно спочатку уважно вивчити певне господарство, підприємство, заклад або окреме виробництво, їх галузі, застосовувані технічні засоби, споруди, будівлі, шляхи, стан електричних мереж, інші об'єкти, що можуть бути віднесені до небезпечних. [24]

Важливого значення у запобіганні аваріям і виробничим травмам має контроль технічного стану обладнання, машин, агрегатів, призначених для виконання різних виробничих процесів та окремих робіт. Специфічні умови таких агрегатів вимагають удосконалення і контролю за ними (табл. 5.2)

«Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій». Затверджено 17.06.99 № 112. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 30.06.1999р. № 424/3717, встановлює порядок розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій (далі ПЛАС),

вимоги до їх складу, змісту та форми, процедуру затвердження й перегляду ПЛАС.

У відповідності з пунктом 4.11. ПЛАС повинен містити аналітичну частину, в якій міститься аналіз небезпек, можливих аварій та їхніх наслідків. Прогнозування подій у вигляді аварій, травм і катастроф на виробництві має надзвичайно важливе значення у розробці ефективних заходів їх запобігання.

Існуючі методи прогнозування таких подій в основному ґрунтуються на аналізі статистичних даних їх наслідків залежно від часу. Але через певні їх недоліки вони не можуть бути застосовані спеціалістами безпосередньо на виробництві. Це пов'язано з тим, що спеціалісти відповідних служб господарств не мають статистичних даних, що характеризують аварійність або ступінь небезпеки тієї чи іншої одиниці обладнання або виробничого процесу. При впровадженні у виробництво нових технологій, технологічних операцій, різних технічних засобів, речовин та матеріалів необхідний певний час для збирання статистичних даних. [24]

Для складання карти контролю необхідно мати схему конструкції машини, обладнання, технологічного процесу.

На схемі повинні бути позначені конструктивні елементи які перевіряють під час оперативного контролю першого ступеня.

Такі карти контролю технічного стану, повинні бути складені на кожний прилад, агрегат, кожну машину та обладнання. Це має особливе значення для машин які виконують небезпечні процеси.

#### **5.4.2 Технологічна картка контролю показників безпеки пристрою для розкатування роликками отворів**

Важливого значення у запобіганні аваріям і виробничим травмам має контроль технічного стану обладнання, машин, агрегатів, призначених для виконання різних виробничих процесів та окремих робіт. Специфічні умови таких агрегатів вимагають удосконалення і контролю за ними.

Для складання технологічної карти контролю необхідно мати схему конструкції машини, обладнання, технологічного процесу (табл. 5.2).

На схемі повинні бути позначені конструктивні елементи, які перевіряють під час оперативного контролю першого ступеня.

Конструкція пристрою для чистового і зміцнюючого розкатування роликів отворів приведена на рис. 4.1. Основні частини, які можуть впливати на безпеку при роботі, це корпус, вісь, опори кочення, важіль, обкатуючі ролики, пружина, клин і деталь.

Таблиця 5.2 - Картка контролю показників безпеки пристрою для розкатування роликів отворів

Елемент агрегату, що підлягає контролю	Характерні несправності	Можливі наслідки небезпеки	Усунення недоліків
Корпус	Тріснув	Неконтрольований виліт	Відремонтувати
Вісь	Зношування, прогинання	Заклинювання	Замінити
Опори кочення	Виникнення радіального биття	Вихід з ладу установки	Замінити
Важіль	Хитається	Травма	Закріпити механізовано
Обкатуючі ролики	Зносилися, хитаються	Аварія	Відремонтувати
Пружина	Лопнула	Вихід з ладу пристрою	Замінити пружину
Клин	Від'єдналася	Виникнення осьових переміщень	Закріпити
Деталь	Тріснув	Аварія	Замінити

## 5.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення безпеки в умовах виникнення надзвичайних ситуацій є невід'ємною складовою частиною комплексного підходу до охорони праці на будь-якому агроінженерному чи машинобудівному підприємстві. Специфіка дільниці механічної обробки, де планується впровадження розробленої технології розкатування отворів зі стабілізацією зусилля, передбачає наявність потенційних ризиків техногенного характеру. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, надзвичайна ситуація визначається як порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвело або може призвести до людських і матеріальних втрат. Для механічних цехів найбільш імовірними надзвичайними ситуаціями є пожежі, аварії на електромережах, руйнування елементів виробничого обладнання з розлітанням осколків, а також аварії комунальних систем (водопостачання, опалення). Планування заходів цивільного захисту на об'єкті повинно базуватися на детальному аналізі цих ризиків та розробці чітких алгоритмів дій персоналу. [23]

Однією з найбільш вірогідних та небезпечних надзвичайних ситуацій у цехах металообробки є виникнення пожежі. Під час процесу розкатування отворів використовуються мастильно-охолоджувальні рідини (МОР), які часто містять у своєму складі мінеральні оливи та інші горючі компоненти. При порушенні технологічного режиму, надмірному терті або виникненні іскри внаслідок контакту інструменту з деталлю, можливе займання парів МОР або промасленого ганчір'я, яке накопичується на робочому місці. Крім того, джерелом пожежі може стати несправність електропроводки верстатного обладнання, коротке замикання в системі керування верстатом або перегрів електродвигунів при тривалих перевантаженнях. Пожежна безпека на об'єкті забезпечується системою запобігання пожежам, системою протипожежного захисту та організаційно-технічними заходами. Виробниче приміщення

повинно бути забезпечене первинними засобами пожежогасіння, зокрема порошковими або вуглекислотними вогнегасниками, ящиками з піском, пожежним інвентарем та внутрішніми пожежними кранами. Вуглекислотні вогнегасники є найбільш ефективними при гасінні електроустановок під напругою та загорянь рідин, оскільки вони не пошкоджують обладнання та не залишають слідів після використання.

У разі виявлення ознак горіння (полум'я, дим, запах гару) кожен працівник зобов'язаний негайно припинити роботу та зупинити обладнання, натиснувши кнопку аварійної зупинки («грибок») та знеструмивши верстат на ввідному щитку. Після цього необхідно терміново повідомити про пожежу пожежну охорону за телефоном «101», вказавши точну адресу об'єкта, місце виникнення пожежі та наявність людей у приміщенні, а також повідомити керівника робіт або адміністрацію підприємства. До прибуття пожежних підрозділів персонал повинен вжити заходів щодо евакуації людей, порятунку матеріальних цінностей (якщо це не загрожує життю) та гасіння пожежі наявними первинними засобами. При цьому категорично забороняється використовувати воду для гасіння електрообладнання під напругою та паливно-мастильних матеріалів, оскільки це може призвести до ураження електричним струмом або розбризкування палаючої рідини та збільшення площі горіння. Для гасіння розлитих мастил слід застосовувати пісок, землю або спеціальні порошкові суміші, перекриваючи доступ кисню до осередку займання.

Іншим типом надзвичайної ситуації, характерним для механічної обробки, є аварійна відмова обладнання, що супроводжується руйнуванням інструменту або деталі. При технології розкатування, незважаючи на застосування системи стабілізації зусилля, існує ризик втомного руйнування роликів, осей або самої оброблюваної втулки через приховані дефекти металу. У випадку розриву деталі, що обертається з високою частотою, кінетична енергія уламків є надзвичайно високою, що створює пряму загрозу життю оператора та оточуючих. Для мінімізації наслідків такої ситуації верстат

повинен бути обладнаний захисними кожухами та екранами, а оператор зобов'язаний використовувати захисні окуляри або щитки. У разі виникнення аварійного шуму, вібрації або удару, оператор повинен негайно вимкнути верстат і відійти на безпечну відстань до повної зупинки обертових частин. Забороняється намагатися гальмувати патрон або деталь руками чи сторонніми предметами. Після зупинки верстата необхідно провести огляд, виявити причину аварії та повідомити майстра. Експлуатація обладнання до повного усунення несправностей та проведення технічної експертизи забороняється.

Окрему увагу слід приділити безпеці при аваріях в системах електропостачання. Раптове зникнення напруги в мережі може призвести до неконтрольованої зупинки верстата, при цьому інструмент може залишитися в зоні контакту з деталлю. При відновленні подачі електроенергії можливий самовільний запуск обладнання, що є вкрай небезпечним. Для запобігання цьому сучасні верстати обладнуються "нульовим захистом" (магнітними пускачами), які вимикають коло при зникненні напруги й вимагають повторного натискання кнопки "Пуск" для відновлення роботи. Проте, у разі ураження людини електричним струмом внаслідок пошкодження ізоляції або замикання на корпус, необхідно діяти миттєво. Головне правило – звільнити потерпілого від дії струму, не торкаючись його відкритих частин тіла, поки він перебуває під напругою. Для цього слід вимкнути рубильник, викрутити запобіжники або перерубати дрот інструментом з ізольованою ручкою. Якщо вимкнути струм неможливо, потерпілого відтягують за сухий одяг, використовуючи гумові рукавички або суху тканину.

Важливою складовою готовності до надзвичайних ситуацій є вміння персоналу надавати домедичну допомогу. При механічних травмах, які супроводжуються кровотечею, першочерговим завданням є її зупинка. При артеріальній кровотечі (кров яскраво-червона, б'є пульсуючим струменем) необхідно накласти джгут вище місця поранення, обов'язково зафіксувавши час накладання. У літній час джгут можна тримати не більше 2 годин, у

зимовий – не більше 1 години, щоб уникнути некрозу тканин. При венонній кровотечі накладають тугу пов'язку безпосередньо на рану. У разі термічних опіків, спричинених контактом з гарячою деталлю або займанням, уражену ділянку слід охолодити холодною водою протягом 15–20 хвилин, накласти чисту стерильну пов'язку та не змащувати опіки олією чи кремами. При ураженні електричним струмом, якщо у потерпілого відсутнє дихання та серцебиття, необхідно негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію (непрямий масаж серця та штучне дихання) і проводити її до відновлення життєдіяльності або прибуття лікарів. На кожній виробничій дільниці повинна бути укомплектована аптечка з необхідними медикаментами та перев'язувальними матеріалами. [24]

Організація евакуації персоналу є критично важливим етапом реагування на будь-яку масштабну надзвичайну ситуацію. На підприємстві повинні бути розроблені та розміщені на видних місцях плани евакуації, які схематично відображають шляхи виходу з приміщень, місця розташування засобів пожежогасіння та кнопок ручного сповіщення. Проходи та виходи повинні завжди утримуватися вільними, не захаращуватися готовою продукцією, тарою чи відходами виробництва. Двері на шляхах евакуації повинні відчинятися в напрямку виходу з приміщення. Система оповіщення про надзвичайну ситуацію повинна бути чутною в усіх куточках цеху, враховуючи рівень виробничого шуму. Керівники підрозділів зобов'язані знати кількість працівників, що перебувають на зміні, та організувати їх виведення у безпечну зону (пункт збору), де провести перекличку. Паніка під час надзвичайної ситуації часто стає причиною додаткових травм, тому регулярне проведення протиаварійних тренувань та навчань є обов'язковим для формування у персоналу стійких навичок правильних дій у стресових умовах.

Психологічна підготовка працівників також відіграє роль у мінімізації наслідків аварій. Стресостійкість та знання чіткого алгоритму дій дозволяють уникнути хаосу. Відповідальність за організацію цивільного захисту на об'єкті

несе керівник підприємства, а безпосередній контроль за станом безпеки на робочих місцях – начальники цехів та майстри. Інженер з охорони праці повинен регулярно проводити інструктажі з питань дій у надзвичайних ситуаціях, перевіряти справність засобів індивідуального та колективного захисту. В контексті проектованої технології розкатування, впровадження автоматизованої системи стабілізації зусилля саме по собі є превентивним заходом, що знижує ймовірність аварійних ситуацій, оскільки виключає критичні перевантаження інструменту та верстата, які могли б призвести до їх руйнування. Таким чином, технічні рішення, закладені в конструкцію пристрою, органічно доповнюють загальну систему безпеки підприємства.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що безпека в надзвичайних ситуаціях на дільниці розкатування отворів забезпечується комплексом заходів: надійною конструкцією технологічного оснащення, справністю верстатного парку, наявністю ефективних систем пожежогасіння та аварійного відключення енергопостачання, а також високим рівнем підготовки персоналу. Дотримання вимог нормативно-правових актів з питань цивільного захисту та охорони праці, регулярний контроль факторів ризику та готовність до оперативних дій у разі виникнення загрози дозволяють мінімізувати ймовірність виникнення аварій, а у випадку їх настання – зберегти життя та здоров'я працівників, а також зменшити матеріальні збитки підприємства. Створення безпечного виробничого середовища є фундаментальною умовою ефективного функціонування технологічного процесу та сталого розвитку виробництва в цілому.

### **Висновки до п'ятого розділу**

У розділі проведено детальний аналіз умов праці при впровадженні технології розкатування отворів деталей обертання зі стабілізацією зусилля, що дозволило ідентифікувати основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, зокрема рухомі елементи обладнання, підвищений рівень шуму та

вібрації. На основі цього розроблено комплекс організаційних та технічних заходів, який включає забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, встановлення захисних огорожень, а також впровадження системи вентиляції, розрахунок якої показав необхідність використання вентилятора продуктивністю 216 Вт для забезпечення кратності повітрообміну на рівні 3.

Окрему увагу приділено питанням пожежної безпеки та діям у надзвичайних ситуаціях, що мінімізує ризики виникнення аварій техногенного характеру. Запропонована система оперативного контролю технічного стану обладнання за допомогою технологічної карти дозволяє своєчасно виявляти несправності критичних вузлів пристрою (корпусу, осей, роликів), що є важливим превентивним заходом для запобігання виробничому травматизму та забезпечення безперебійної роботи дільниці механічної обробки.

## 6 РОЗРОБКА БІЗНЕС-ПЛАНУ

### 6.1 Резюме

Сучасний стан агропромислового комплексу характеризується високим ступенем зношеності машинно-тракторного парку та постійним зростанням вартості запасних частин і нової техніки. За таких умов особливої актуальності набуває впровадження ресурсозберігаючих технологій, що дозволяють продовжувати термін експлуатації відповідальних вузлів і деталей сільськогосподарських машин. Одним із перспективних напрямків є використання методу поверхневого пластичного деформування для зміцнення та відновлення внутрішніх поверхонь деталей типу втулок, гільз та корпусних елементів. Мета даного бізнес-плану полягає в обґрунтуванні техніко-економічної доцільності впровадження технології розкатування отворів зі стабілізацією зусилля на базі існуючого ремонтного підприємства. [25]

Розроблений бізнес-план базується на таких вихідних умовах реалізації інвестиційного проекту. По-перше, підприємство спеціалізується на технічному обслуговуванні та ремонті тракторів, комбайнів і сільськогосподарських машин, надаючи послуги як для власних потреб, так і для інших господарств регіону. По-друге, фінансування проекту здійснюється виключно за рахунок власних коштів підприємства без залучення кредитних ресурсів, що знижує фінансові ризики та спрощує адміністрування проекту. По-третє, виробнича база вже існує і потребує лише доукомплектування спеціалізованим оснащенням – установкою для зміцнювального та чистового розкатування отворів, що монтується на наявному токарно-гвинторізному верстаті 1К62.

Технологія поверхнево-пластичного деформування дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні властивості відновлених деталей: зносостійкість зростає на 30–50%, втомна міцність – на 20–40%, при цьому шорсткість

поверхні знижується до  $Ra = 0,16-0,32$  мкм. Застосування розробленого пристрою зі стабілізацією зусилля забезпечує рівномірність зміцнення та виключає появу хвилястості, що є критичним для якості спряжень. Впровадження даної технології дозволить розширити перелік послуг підприємства та сформувати додаткове джерело доходу за рахунок надання послуг стороннім замовникам. [26]

Реалізація проекту передбачає мінімальні капітальні вкладення у придбання технологічного оснащення, що робить його доступним для більшості ремонтних підприємств агропромислового комплексу. Очікуваний економічний ефект обумовлений зниженням потреби у придбанні нових запасних частин, скороченням простоїв техніки та підвищенням міжремонтного ресурсу відновлених вузлів. Подальші розділи бізнес-плану містять детальний аналіз виробничих витрат, калькуляцію собівартості послуг, розрахунок показників ефективності та оцінку потенційних ризиків проекту.

## 6.2 Пропоновані послуги

Поверхнево-пластичне деформування (ППД) є ефективним засобом підвищення втомної міцності, зносостійкості і зниження шороховатості деталей машин. Можливість використання універсального устаткування і недорогого оснащення дозволяє використовувати цей спосіб обробки в різноманітних умовах виробництва. При виготовленні і експлуатації деталей машин на їх поверхні утворюються нерівності і мікро нерівності, а шар металу, прилягаючий до поверхні, має нерідко нову структуру, фазовий і хімічний склад в порівнянні з серцевиною, в ньому виникають залишкові напруження. [25]

Часто руйнування деталей починається з поверхні, наприклад при зношуванні, ерозії, втомлюванні, контактному втомлюванні і багатьох інших випадках. Тому до поверхневого шару висувають більш високі вимоги, ніж до

глибинних шарів деталі. Одним з ефективних і простих методів зміцнення поверхневого шару є поверхнево-пластичне деформування. Воно дає можливість підвищити довговічність деталей машин на 15-20 %.

Послуги що можуть надаватись з застосуванням технології зміцнення втулок та валів с.г. машин з допомогою ППД представлені в додатку А.

### 6.3 Виробничий план

Виробничою базою стане існуюче виробниче приміщення, яке буде доукомплектоване необхідним устаткуванням (табл. 6.1). Установка для обкатування буде встановлена на станок 1К62.

Виконання послуг пов'язане з виникненням таких поточних витрат:

- на оплату праці виробничого персоналу;
- на електроенергію;
- на ремонт та технічне обслуговування обладнання;
- на амортизацію;
- інші.

Таблиця 6.1 - Машини і устаткування

Назва обладнання	Купівля чи оренда	Нове чи вживане	Вартість (грн.)
Установка для зміцнюючого і чистового розкатування отворів	Купівля	Нове	23000

Витрати на оплату праці виробничого персоналу виходячи з десятигодинної тривалості зміни включають заробітну плату згідно з трудомісткістю різних видів обслуговувань та середньої тарифної ставки і нарахувань на фонд оплати праці. [26]

Зарплата розраховується:

$$ЗП_{\text{м}} = \Phi_{\text{м}} \cdot C_{\text{г}} \quad (6.1)$$

де  $\Phi_{\text{м}}$  - робочих годин в місяць, год.  $\Phi_{\text{м}} = 210$  год.

$C_{\text{г}}$  - погодинна ставка токаря 4-го розряду, грн.  $C_{\text{г}} = 86,79$  грн.

$$ЗП_{\text{м}} = 210 \cdot 86,79 = 18225,9 \text{ грн.}$$

Річна заробітна плата:

$$ЗП_{\text{р}} = ЗП_{\text{м}} \cdot 12 \quad (6.2)$$

$$ЗП_{\text{р}} = 18225,9 \cdot 12 = 218710,8 \text{ грн.}$$

Нарахування на заробітну плату:

$$B_{\text{пдфо}} = ЗП_{\text{р}} \cdot 19,5\% \quad (6.3)$$

$$B_{\text{пдфо}} = 218710,8 \cdot 19,5\% = 42648,61 \text{ грн.}$$

Річний фонд оплати праці:

$$\Phi_{\text{р}} = ЗП_{\text{р}} + B_{\text{пдфо}} \quad (6.4)$$

$$\Phi_{\text{р}} = 218710,8 + 42648,61 = 261359,41 \text{ грн.}$$

Отримані дані заносимо в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 - Потреба в працівниках

Категорія персоналу	Необхідна чисельність	Клас, розряд робітника	Годинна тарифна ставка, грн.	Заробітна плата за рік, грн.	Нарахування на заробітну плату ПДФО, грн.	Річний фонд оплати праці, грн.
Токар	1	IV	86,79	218710,8	42648,61	261359,41
Разом	1	-		218710,8	42648,61	261359,41

Витрати на амортизаційні відрахування розраховуються виходячи з вартості обладнання та річної норми амортизаційних відрахувань - 15,0 %.

Сума амортизаційних відрахувань:

$$V_{\text{ам.}} = V_{\text{обл.б.пдв}} \cdot 15\% \quad (6.5)$$

де  $V_{\text{обл.б.пдв}}$  - вартість обладнання без ПДВ, грн.

$$V_{\text{обл.б.пдв}} = \frac{V_{\text{обл.}}}{120\%} \quad (6.6)$$

де  $V_{\text{обл.}}$  - вартість обладнання, грн.  $V_{\text{обл.}} = 23000$  грн.

$$V_{\text{обл.б.пдв}} = \frac{23000}{120\%} = 19166,67 \text{ грн.}$$

$$V_{\text{ам.}} = 19166,67 \cdot 15\% = 2875 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання розраховуються виходячи з вартості обладнання та річної норми відрахувань на ТО-4,0 %.

Норма відрахувань на ремонт – 4% від балансової вартості за рік.

$$V_{\text{ТО}} = V_{\text{обл.б.пдв}} \cdot 4\% \quad (6.7)$$

$$V_{\text{ТО}} = 19166,67 \cdot 4\% = 766,67 \text{ грн.}$$

Отримані значення витрат на амортизаційні відрахування та на ремонт і технічне обслуговування обладнання заносимо в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 - Розрахунок витрат на амортизацію і ремонт.

Назва обладнання	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %.	Сума амортизаційних відрахувань, грн.	Відрахування на ремонт, %.	Сума витрат на ремонт, грн..
Установка для зміцнюю чога і чистового розкатування отворів	19166,67	15	2875	4	766,67

Витрати на електроенергію розраховуються виходячи зі встановленої потужності електричного обладнання, коефіцієнту його одночасної роботи, який для даного обладнання дорівнює 0.6, тривалості роботи обладнання та ціни 1 кВт-години електроенергії (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 - Витрати на електроенергію.

Перелік обладнання, що споживає електроенергію	Марка	Встановлена потужність, кВт
Токарно-гвинторізний станок	1К62	10
Ефективний фонд часу роботи обладнання, годин на рік		2540
Всього спожитої електроенергії, кВт.		15240
Вартість 1 кВт, грн..		5,7
Витрати на електроенергію, грн..		86868

Ефективний фонд часу роботи обладнання розрахований виходячи з однозмінного режиму роботи при тривалості робочої зміни 10 годин та п'ятиденного робочого тижня.

$$T_e = T_k \cdot K_z \cdot Z_T \quad (6.8)$$

де:  $T_k$  – календарний фонд роботи обладнання, діб;  $T_k = 254$  дня;

$K_z$  – кількість змін роботи обладнання на добу (одно-, двох- або трьохзмінний режим), од.,  $K_z = 1$ ;

$Z_T$  – тривалість зміни, год.,  $Z_T = 10$  год.

$$T_e = 254 \cdot 1 \cdot 10 = 2540 \text{ год.}$$

Розрахуємо спожиту технологічну електроенергію:

$$W = T_e \cdot P_o \cdot K_{од} \quad (6.9)$$

де  $P_o$  - потужність обладнання, кВт.,  $P_o = 10$  кВт;

$K_{од}$  - коефіцієнт одночасної роботи електрообладнання, од.,  $K_{од} = 0,6$

$$W = 2540 \cdot 10 \cdot 0,6 = 15240 \text{ кВт}$$

Витрати на електроенергію розраховуємо за формулою:

$$B_{ел.} = W \cdot C_{ел.} \quad (6.10)$$

де  $C_{ел.}$  - ціна за 1 кВт електроенергії для підприємства, грн.,  
 $C_{ел.} = 5,7$  грн.

$$B_{ел.} = 15240 \cdot 5,7 = 86868 \text{ грн.}$$

Загальногосподарські витрати включають витрати на оплату послуг банківських установ та непередбачені витрати. Їх розмір приймається укрупнено на рівні 10% фонду оплати праці без нарахувань.

$$V_{з.г.} = 3П_p \cdot 10\% \quad (6.11)$$

$$V_{з.г.} = 218710,8 \cdot 10\% = 21871,08 \text{ грн.}$$

Змінні витрати:

$$V_{змін.} = \Phi_p + V_{ел.} \quad (6.12)$$

$$V_{змін.} = 261359,41 + 86868 = 348227,41 \text{ грн.}$$

Постійні витрати:

$$V_{пос.} = V_{ам.} + V_{то} + V_{з.г.} \quad (6.13)$$

$$V_{пос.} = 2875 + 766,67 + 21871,08 = 25512,75 \text{ грн.}$$

Річні виробничі витрати розраховуємо:

$$V_{в.р.} = V_{змін.} + V_{пос.} \quad (6.14)$$

$$V_{в.р.} = 348227,41 + 25512,75 = 373740,16 \text{ грн.}$$

Отримані результати заносимо в таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 - Річні виробничі витрати.

Статті витрат	Сума, грн.
Оплата праці виробничого персоналу з нарахуваннями	261359,41
Електроенергія	86868
Змінні витрати	348227,41
Амортизаційні відрахування	2875
Ремонт та технічне обслуговування обладнання	766,67
Загальногосподарські витрати	21871,08
Постійні витрати	25512,75
Річні виробничі витрати	373740,16

Змінні витрати на 1 нормо-годину роботи станка:

$$V_{\text{змін.н.год}} = \frac{V_{\text{змін.}}}{T_e} \quad (6.15)$$

$$V_{\text{змін.н.год}} = \frac{348227,41}{2540} = 137,1 \text{ грн.}$$

Затрати на 1 год. роботи станка:

$$V_{\text{н.год}} = \frac{V_{\text{в.р.}}}{T_e} \quad (6.16)$$

$$V_{\text{н.год}} = \frac{373740,16}{2540} = 147,14 \text{ грн.}$$

#### 6.4 Фінансовий план

Річний економічний ефект, який може бути отриманий в результаті підвищення якості деталей машин після проведення поверхнево-пластичного деформування

Планується надавати послуги з обкатування деталей найближчим фермерським господарствам та іншим господарствам району. При наданні послуг на сторону буде використовуватися витратний метод ціноутворення з фіксованою нормою прибутку.

Ціна 1 нормо-години з нормою прибутку і ПДВ:

$$C_{\text{н.год}} = B_{\text{н.год}} \cdot 30\% \quad (6.17)$$

$$C_{\text{н.год}} = 147,14 + 35\% \approx 200 \text{ грн.}$$

Виручка:

$$BP = T_e \cdot C_{\text{н.год}} \quad (6.18)$$

$$BP = 2540 \cdot 200 = 508000 \text{ грн.}$$

Податок на додану вартість від виручки:

$$\text{ПДВ} = BP \cdot 20\% \quad (6.19)$$

$$\text{ПДВ} = 485851,2 \cdot 20\% = 101600 \text{ грн.}$$

Виручка без ПДВ:

$$BP_{\text{б.ПДВ}} = BP - \text{ПДВ} \quad (6.20)$$

$$BP_{\text{б.ПДВ}} = 508000 - 101600 = 406400 \text{ грн.}$$

Прибуток:

$$\Pi = \text{ВР}_{\text{б.ПДВ}} - \text{В}_{\text{в.р.}} \quad (6.21)$$

$$\Pi = 406400 - 373740,16 = 32659,84 \text{ грн.}$$

Рівень рентабельності:

$$P = \frac{\Pi}{\text{В}_{\text{вал.}}} \cdot 100\% \quad (6.22)$$

$$P = \frac{32659,84}{373740,16} \cdot 100\% = 8,74\%$$

Термін окупності:

$$T = \frac{\text{В}_{\text{обл}}}{\Pi} \quad (6.23)$$

$$T = \frac{23000}{32659,84} \approx 0,7 \text{ року}$$

Таблиця 6.6 - Показники ефективності реалізації проекту за рік

Показники	Значення
Всього валових витрат, грн, в т.ч.:	373740,16
постійні	25512,75
змінні	348227,41
Виручка з ПДВ, грн.	508000
Виручка без ПДВ, грн.	406400
Прибуток, грн.	32659,84
Рівень рентабельності, %	8,74
Термін окупності, років	0,7

Визначаємо точку беззбитковості графічним методом (рис 6.1):

$$T_{\text{б}} = \frac{V_{\text{пос.}}}{C_{\text{н.год}} - V_{\text{змін.н.год}}} \quad (6.24)$$

$$T_{\text{б}} = \frac{25512,75}{200 - 137,1} \approx 405 \text{ нормо - годин.}$$

Виручка в точці беззбитковості:

$$VP_{\text{т.б}} = T_{\text{б}} \cdot C_{\text{н.год}} \quad (6.25)$$

$$VP_{\text{т.б}} = 405 \cdot 200 = 81000 \text{ грн.}$$

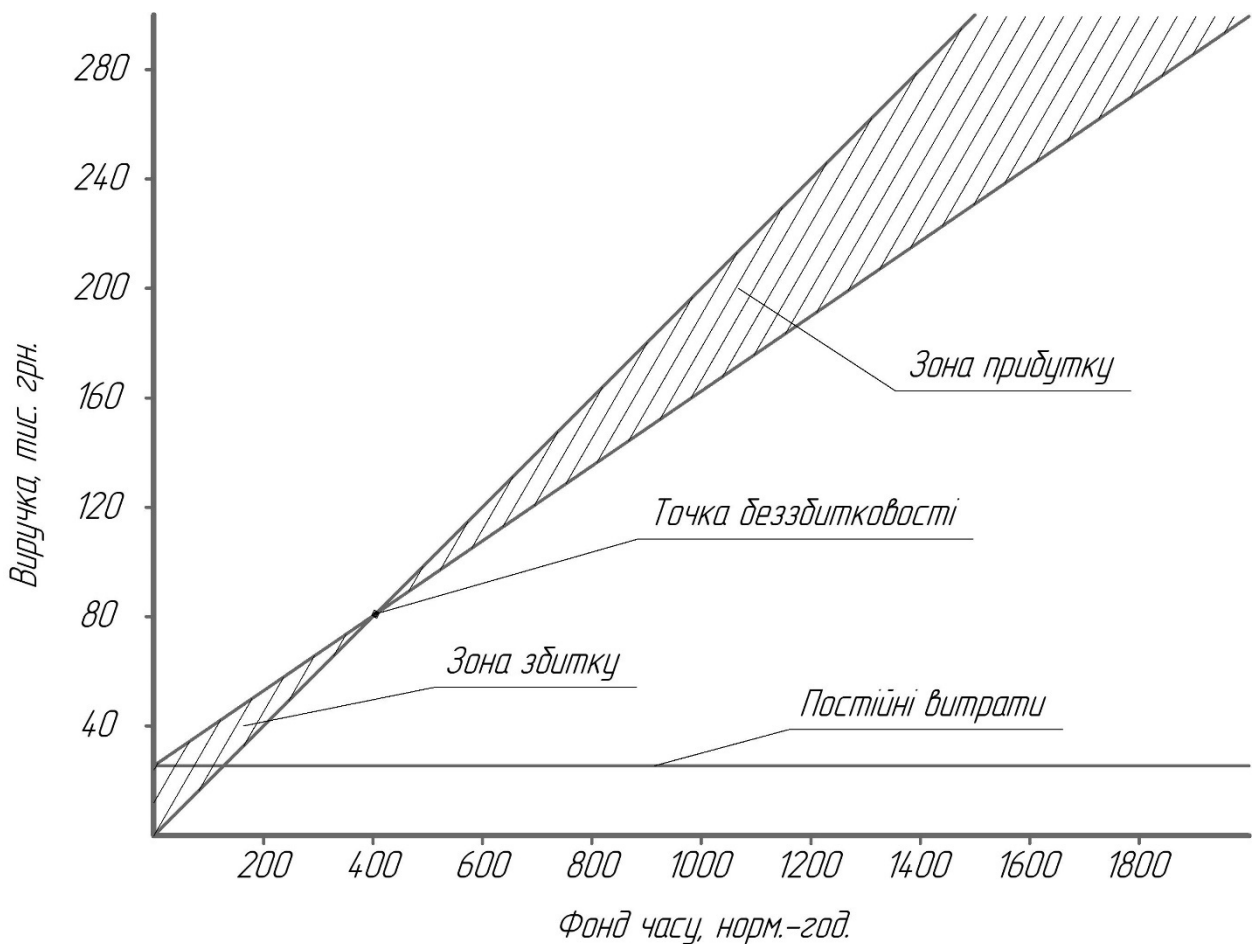


Рисунок 6.1 - Графік точки беззбитковості.

## 6.5 Ризики та шляхи їх зниження

Можливі ризики та заходи щодо їх зниження: [25]

### 1. Ризики, зв'язані зі змінами умов на ринку:

- умови конкуренції - використання сучасного устаткування і технологій, які дають змогу при використанні збільшити надійність деталей в 2-4 рази, що є вагомим фактором при конкуренції;
- інфляція - фінансовий план дає змогу створення допоміжного фонду щодо подолання інфляції;
- жорсткість вимог по охороні навколишнього середовища - постійний контроль усіх параметрів технологічного процесу переробки відходів.

### 2. Ризики, зв'язані з інвестиційною програмою:

- інвестиційна програма не досягне проектних цілей - поетапне виконання інвестиційної програми дозволяє контролювати її хід цілей;
- світова фінансова криза - використання запобіжних заходів передбачених Кабінетом Міністрів, а також світової спілкою підприємців, надання послуг бартером, в кредит.

## Висновки до шостого розділу

Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність впровадження технології розкатування отворів зі стабілізацією зусилля на ремонтному підприємстві агропромислового комплексу. Капітальні вкладення у придбання технологічного оснащення становлять 23 тис. грн, річна виручка від надання послуг прогнозується на рівні 508 тис. грн, а чистий прибуток – 32,7 тис. грн. Термін окупності інвестицій не перевищує 0,7 року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

Розрахунок точки безбитковості показав, що для покриття постійних витрат достатньо завантаження обладнання на рівні 405 нормо-годин на рік (близько 16% від планового фонду часу), що забезпечує значний запас фінансової міцності. Впровадження запропонованої технології дозволить не лише отримати економічний ефект, а й підвищити якість відновлюваних деталей, скоротити потребу у придбанні дорогих запасних частин і збільшити міжремонтний ресурс вузлів сільськогосподарської техніки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. На основі аналізу науково-технічних джерел та існуючих технологій поверхневого пластичного деформування встановлено, що розкатування роликками є одним з найефективніших методів фінішної обробки отворів, який забезпечує підвищення зносостійкості на 30–50% та зниження шорсткості до  $R_a = 0,08–0,32$  мкм. Виявлено, що основним недоліком існуючих конструкцій є чутливість до радіального биття роликів, що призводить до появи хвилястості на обробленій поверхні та обмежує застосування методу в умовах ремонтного виробництва.

2. Теоретичними дослідженнями обґрунтовано закономірності формування параметрів якості поверхневого шару при розкатуванні отворів. Встановлено взаємозв'язок між зусиллям обкатування, геометрією інструменту та вихідними показниками шорсткості, мікротвердості й глибини зміцненого шару. Доведено, що стабілізація робочого зусилля є визначальним фактором для отримання рівномірного зміцнення та виключення хвилястості поверхні.

3. Експериментальними дослідженнями підтверджено теоретичні положення щодо впливу режимів розкатування на якість обробки. Визначено оптимальні параметри процесу: зусилля обкатування 120–200 Н, подача 0,07–0,3 мм/об, профільний радіус ролика 5–8 мм залежно від діаметра отвору. За оптимальних режимів досягається шорсткість  $R_a = 0,08–0,16$  мкм при вихідній  $R_z = 80–160$  мкм, мікротвердість поверхні зростає в 1,6–4,6 рази.

4. Розроблено вдосконалену конструкцію роликового розкатника зі стабілізацією зусилля, що забезпечує компенсацію похибок форми заготовки та виключає вплив радіального биття інструменту на якість поверхні. Пристрій призначений для обробки отворів діаметром 20–205 мм і може встановлюватися на універсальні токарно-гвинторізні верстати типу 1К62. Запропоновано методику призначення режимів розкатування залежно від вимог до шорсткості та діаметра отвору.

5. Розроблено комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності при впровадженні технології розкатування на ремонтних підприємствах. Проведено аналіз потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, визначено вимоги до організації робочого місця, вентиляції, освітлення та електробезпеки відповідно до чинних нормативних документів. Запропоновано заходи щодо дій персоналу в надзвичайних ситуаціях.

6. Техніко-економічним обґрунтуванням підтверджено доцільність впровадження розробленої технології. Капітальні вкладення у придбання технологічного оснащення становлять 23 тис. грн., річна виручка від надання послуг – 508 тис. грн., чистий прибуток – 32,7 тис. грн.. Термін окупності інвестицій не перевищує 0,7 року, точка беззбитковості досягається при завантаженні обладнання на рівні 16% від планового фонду часу, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Методичні рекомендації для виконання та оформлення дипломної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності Н7 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, Комарніцький С.П. За ред. В.І. Дуганця. Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. 52 с.
2. Сорваніді Ю. Г. Технічний сервіс в АПК : навч. посіб. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. 180 с.
3. Домуші Д. П. Ремонт тракторів і автомобілів : посібник. Одеса : ОДАУ, 2020. 156 с.
4. Добрянський С. С. Технологічні основи машинобудування : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 354 с.
5. Youssef H. A., El-Hofy H. A., Ahmed M. H. Manufacturing Technology: Materials, Processes, and Equipment. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2023. 726 p.
6. Najera Bernabeu J. Surface Treatment Methods for Metal Automotive Frame Structures : Master's thesis. Halmstad : Halmstad University, 2023. 65 p.
7. Keymanesh M. Multi-roller taper burnishing of internal chamfers and its effect on fatigue life. International Journal of Fatigue. 2024. Vol. 178. Art. 108015.
8. Борак К. В. Методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : монографія. Суми : СНАУ, 2023. 145 с.
9. Кремнєв Г. П., Колеснік В. М. Тенденції розвитку машинобудування : навч. посіб. Харків : ХНЕУ, 2025. 156 с.
10. Zhang C. Digital twin-based approaches for agricultural machinery damage prediction and maintenance. Journal of Computational Design and Engineering. 2025. Vol. 12. Issue 10. P. 87–115.

11. Тарельник В. Б. Властивості поверхонь деталей із криці зі зносостійкими покриттями. *Металофізика та новітні технології*. 2023. Т. 45. № 5. С. 663–680.
12. Dzionk S. The characteristics of the surface structure obtained in a burnishing process for various materials. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 17523.
13. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В. *Механотроніка : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 372 с.*
14. Le M. T. Performance optimization of multi-roller flat burnishing process. *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 2023. Vol. 43. P. 54–62.
15. Abdallah A. M. The Effect of Initial Surface Profile on Surface Characteristics Obtained by Burnishing Processes. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 116. P. 345–358.
16. Мельченко А. С. Аналіз сучасних досягнень методів хіміко-термічної обробки. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. № 2. С. 34–42.
17. Віштак І. В. Вплив режимів шліфування на основні параметри якості поверхневих шарів. *Перспективи та інновації науки*. 2025. № 11 (42). С. 168–178.
18. Герук С. М. Відновлення деталей сільськогосподарських машин зварюванням і наплавленням : монографія. Житомир : ПолісУ, 2021. 256 с.
19. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем : матеріали конференції. Київ : НУБіП, 2023. 148 с.
20. Проблеми надійності та міцності машин і конструкцій : матеріали конференції. Суми : СНАУ, 2023. 86 с.
21. Wołowczyk J. Occupational Safety Management in Steel Mills. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*. 2024. Vol. 6. Issue 1. P. 486–492. DOI: 10.2478/czoto-2024-0049.

22. Близнюк А. Вплив інноваційних технологій на підвищення ефективності діяльності автотранспортних підприємств. Економіка та суспільство. 2023. № 47.

23. Охорона праці в Україні. Нормативні документи. Київ : КНТ, вид-во, 2024. 438 с.

24. Мелех Л. В. Безпека життєдіяльності та охорона праці : навч. посіб. Львів : ЛьвДУВС, 2021. 196 с.

25. Дачковський В. Техніко-економічне оцінювання експлуатації озброєння та військової техніки. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 4 (76). С. 76–84.

26. Григорків В. С. Економіка підприємства : підручник. Чернівці : ЧНУ, 2021. 450 с.