

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

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

ДИПЛОМНА РОБОТА
магістр
(освітній рівень)

тема роботи «УДОСКОНАЛЕННЮ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЦИКЛІЧНИМИ ДИНАМІЧНИМ
НАВАНТАЖЕННЯ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 23м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
Поліщук В.Г.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Лісовий І.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2024 рік

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

А.В. Войтік

“ _____ ” _____ 20 ____ р.

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

студенту _____ Поліщуку Веніаміну Геннадійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Удосконаленню та дослідження технологічного процесу відновлення деталей з циклічними динамічним навантаження» _____

керівник роботи _____ Лісовий І.О., к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“14” листопада 20 23 р. № 01-06/261

2. Строк подання студентом роботи _____ 20.11.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи; _____

4. Перелік питань, які потрібно розробити: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: _____

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 18 квітня 2024 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка

Студент_____
(підпис)Поліщук В.Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи_____
(підпис)Лісовий І.О.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1. Аналіз способів відновлення поршневих пальців	8
1.2 Характерні відмови поршневих пальців	9
1.3. Визначення залишкових внутрішніх напружень циліндричних деталей в процесі їх роздачі	10
1.4 Аналіз базового технологічного процесу, обґрунтування та вибір оптимального методу відновлення поршневих пальців	13
1.5 Задачі досліджень	15
Висновки до розділу	15
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПОРШНЕВОГО ПАЛЬЦЯ	16
2.1 Фізика процесу приросту зовнішнього діаметра поршневого пальця	16
Висновки до розділу	20
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	21
3.1 Дослідження структури та властивостей матеріалу відновлених поршневих пальців	21
3.2 Твердість та мікротвердість робочої поверхні матеріалу поршневих пальців	26
3.3 Внутрішні напруження матеріалу	27
3.4 Дослідження зносостійкості поршневих пальців	30
3.5 Визначення механічної міцності	32
Висновки до розділу	33
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	35
4.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час ремонту та відновлення двигунів	35
4.2 Розробка організаційно-технічних заходів по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці під час ремонту та відновлення двигунів	37
4.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час ремонту та відновлення двигунів	40
Висновки до розділу	41
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43
ДОДАТКИ	50

РЕФЕРАТ

Поліщук В.Г. «Удосконаленню та дослідження технологічного процесу відновлення деталей з циклічними динамічним навантаження». (Магістерська робота. Умань, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 50 сторінках, 21 рисунка, графічна частина підготовлено ілюстративний матеріал у вигляді презентації 12 слайдів як додаток до доповіді за темою магістерської роботи)

В пояснювальній записці зроблено аналіз існуючих методів відновлення поршневих пальців, даний опис обраного методу відновлення, розроблений маршрут відновлення, підібране обладнання, а також виконані розрахунки режимів виконання технологічних операцій; пропонується до впровадження пристосування для виконання гідротермічного роздавання поршневих пальців, а також пристосування для механічної обробки зовнішніх фасок відновлених поршневих пальців (наведені розрахунки); економічна частина містить порівняльний економічний розрахунок виконуваних операцій в базовому та пропонуємому технологічних процесах, наведена економічна доцільність введення пропонуємого технологічного процесу; розроблено планування ділянки для відновлення поршневих пальців, приведені розрахунки фондів часу, кількості працівників, обладнання та інше.

Зроблений аналіз небезпек та шкоди яка є в наявності на ділянці відновлення поршневих пальців та засоби по їх усуненню.

Ключові слова: ПОРШНЕВИЙ ПАЛЕЦЬ, РЕМОНТ, МАШИНА, ЕНЕРГОЄМНІСТЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ.

ВСТУП

Однією з складових умов розвиненої держави є розвинене сільське господарство, яке в свою чергу не може мати високий рівень розвитку без ефективного використання створеного виробничого потенціалу та наявності міцної матеріально-технічної бази [1].

Простоювання техніки на ремонтних підприємствах займає час, а витрати на ремонт є значними. Тому, важливим резервом підвищення ефективності використання техніки та економії матеріальних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів є відновлення зношених деталей [2].

Економічна доцільність відновлення зношених деталей обумовлена можливістю повторного (дуже часто неодноразового) використання від 65 до 75% деталей. Собівартість відновлення деталей не перевищує 75% вартості нових, а використання матеріалу в 15-20 разів нижче, чим при виготовленні деталей [1, 2].

В даний час доля відновлених деталей в загальному об'ємі запасних частин складає від 18 до 19%, в подальшому цей показник планується довести до 40%.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок про те, що ремонтні підприємства є важливим елементом в ланцюзі технічного сервісу, особливо якщо це спеціалізовані підприємства. В зв'язку зі складними фінансово-економічними умовами, що склалися в даний час переоснащення господарств на селі технікою практично припинилося, отже автоматично постає питання ефективного використання тієї техніки, що лишилася. Особливо це стосується складної та дорогої техніки: автомобілів, тракторів та комбайнів як в цілому, так і окремих їх вузлів і агрегатів [3-7].

Для підтримання техніки в робочому стані необхідно проводити цілий ряд заходів: технічні огляди та обслуговування, поточний та капітальний ремонт, та інше. Важливим шляхом зниження собівартості ремонту є розробка високоефективних технологічних процесів відновлення зношених деталей, а

також удосконалення з точки зору механізації та економічної ефективності уже існуючих [8].

Дана проблема поставлена і у запропонованому дипломному проекті, де завдяки модернізації устаткування була створена установка для відновлення поршневих пальців дизельних двигунів, що дає змогу знизити собівартість відновлення поршневих пальців у порівнянні з існуючими технологічними процесами [9].

Процес відновлення поршневих пальців є важливою складовою під час капітального ремонту двигунів, так як відновлені поршневі пальці мають меншу вартість у порівнянні з новими і при цьому забезпечують 100% ресурс роботи.

Мета роботи – провести аналіз та умов роботи поршневих пальців дизельних двигунів, виявити принцип способу відновлення деталей термічною обробкою для підвищення міцності робочої поверхні.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз способів відновлення поршневих пальців

У зв'язку зі зростаючим обсягом випуску двигунів внутрішнього згоряння проблема відновлення ПП актуальна. Щорічно відновлюється більш 8-10 млн. Штук ПП. У ремонтній практиці широко використовуються такі методи відновлення ПП: перешліфовка на менший діаметр, роздача пуансоном, обкатка і гальванічні покриття залізненням і хромуванням [2-5]. Якщо ПП вибраковано тільки по зносу зовнішньої поверхні, то вони можуть бути перешліфовані на менший діаметр. Одним з високопродуктивних способів відновлення є роздача пуансоном, який застосовується для відновлення тільки порожніх деталей, таким чином, що через отвір продавлюють пуансон більшого діаметра. Але цей спосіб має істотний недолік: утворюються тріщини на зовнішній поверхні пальця [5]. Тому розроблені і впроваджені у виробництво різні способи роздачі: гідротермічна, механічна, з електрогідравлічним ефектом, термопластична і т.д. Існує технологічний процес відновлення ПП двигунів механічною роздачою. Процес передбачає відпал пальців, деформування їх шляхом продавлювання через отвір кульок; термічну (цементация, гартування, низькотемпературний відпуск), механічну обробку (шліфування, полірування), дефектоскопію деталей. Встановлено, що при автоматичній деформації ПП кулькою 0,25мм він збільшується по зовнішньому діаметру на 0,05...0,07мм, що цілком достатньо для механічної обробки. Більш продуктивним процесом, ніж механічна роздача, є відновлення ПП в загартованому стані із застосуванням електрогідравлічного ефекту. В результаті електрогідравлічного вибуху і впливу ударної хвилі на ПП він роздається по зовнішньому діаметру [6]. Ефективним процесом відновлення ПП автотракторних дизелів, виготовлених з дефіцитної хромонікелевої сталі, є гідротермічна роздача. Суть її полягає в тому, що необхідного збільшення розмірів ПП по зовнішньому діаметру досягають, нагрів ТВЧ деталь до температури аустенізації цементованого шару, 960...1130К, а потім, затиснувши її по торцях, миттєво охолоджують потоком води через внутрішній отвір пальця.

Одним з найпростіших і універсальних методів відновлення ПП є обкатка роликами або кульками [3-7]. Сутність обкатки заснована на витісненні робочим інструментом (кулькою або роликами) матеріалу, тобто виступаючі нерівності мнуть, заповнюючи западини оброблюваної поверхні, досягаючи шорсткості поверхні $Ra=0,04\text{мкм}$, при цьому підвищується твердість і міцність верхнього шару металу. Найбільше застосування отримало нанесення гальванічних покриттів залізненням і хромуванням [10].

1.2 Характерні відмови поршневих пальців

Деталлями, які лімітують надійність двигунів внутрішнього згорання є поршневі пальці. Пошкодження та руйнування поршневих пальців (ПП) можуть виникнути в результаті перевантаження при порушенні режиму згорання, впливу сторонніх тіл або дефектів матеріалу [11, 12]. Пошкодження ПП, як правило, є наслідком перевантаження за умови, що немає дефектів матеріалу.

Величину зносу ПП визначають органолептичними методами або ж з використанням вимірювального інструменту. Візуально можна встановити тріщини, відколи, риски, викришування цементованої шару, каверни, кольори мінливості від нагрівання в разі заїдання в підшипнику. Вимірюванням можна визначити діаметр ПП, його овальність і конусність. ПП з явними дефектами, з шорсткістю поверхні більш $Ra\ 0,100\ \text{мкм}$ та зносом понад $0,05\ \text{мм}$ на $10\ \text{мм}$ діаметра підлягають заміні. Вимірювання ПП проводять у вертикальній і горизонтальній площинах в чотирьох перетинах (в середині бобишок і два у втулці шатуна). Дефекти матеріалу ПП можна, однозначно визначити при дослідженнях матеріалу зламаного пальця [6]. Через овальну деформацію ПП в отворі при перевантаженні на кінцях пальця утворюється поздовжні тріщини, які можуть виходити із зовнішньої поверхні або із внутрішнього боку отвору. Тріщини можуть проходити далі у вигляді втомного зламу в напрямку осі пальця. У зоні найбільшого навантаження зсуву і вигину між бобишкою поршневого пальця і бобишкою шатуна тріщина може перейти у поперечну

тріщину, що в кінцевому рахунку призводить до руйнування всього пальця. Разом з тим, досвід показую, що перша тріщина ПП може виникнути не лише від перевантаження, але й від порушень технологічного процесу складання шатунно-поршневих груп. Це виникає тоді, коли поршковий палець встановлюється без використання спеціальних оправок та пристосувань для запресування поршневих пальців. Оскільки ПП працюють у важких умовах, то до них висуваються жорсткі вимоги на міцність і геометричну форму (ГОСТ 616-79). Зовнішня поверхня ПП підлягає цементації після чого здійснюється гартування. Мікроструктура загартованого шару ПП повинна складатися з дрібногочастого мартенситу, в якому допускаються рівномірно розподілені включення цементиту, залишкового аустеніту та троститу. Твердість робочої поверхні ПП у відповідності з вимогами ГОСТ 616-79 повинна становити HRC 56 до 63, а серцевини – від HRC 20 до 35. Встановлено, що зношування ПП залежить від багатьох причин, які не пов'язані між собою певною залежністю і в сукупності своїй є випадковими. Тому, для обґрунтування можливості відновлення ПП до номінальних розмірів необхідно застосувати статистичні методи, виявити фактори, що мають суттєвий вплив на величину і характер зношування ПП, побудувати статистичну модель його зношування [13, 14, 15].

1.3. Визначення залишкових внутрішніх напружень циліндричних деталей в процесі їх роздачі

Сучасні методи зміцнення з використанням прогресивних технологічних процесів дають нам змогу керувати показниками якості поверхневих та приповерхневих шарів матеріалу деталей. Досягнення високої довговічності можливе формуванням та оптимізацією параметрів поверхонь і приповерхневих шарів, зокрема: мікротвердістю, глибиною і знаком залишкових напружень. У літературі є цілий ряд досліджень по обґрунтуванню вимог до зміцненого шару деталей [16, 17, 18, 19]. У цих роботах показана необхідність досягнення такого рівня твердості та залишкових напружень по глибині поверхневого шару, який

би максимально відповідав експлуатаційним вимогам. Одним із найбільш ефективних методів підвищення ресурсу деталей машин є зміцнення їх пластичним деформуванням. Основними характеристиками пластичної деформації є параметри, що характеризують статичну або динамічну схеми деформування. У технічній літературі, в основному, висвітлюються технології зміцнення пластичним деформуванням окремих типів деталей у машинобудуванні при їх виготовленні. Необхідно зазначити, що використання пластичного деформування у технічному сервісі при відновленні зношених деталей машин описано недостатньо. Отже, процеси пластичного деформування при ремонті деталей машин потребують самостійних досліджень [19]. Найбільшою мірою це стосується досліджень залишкових напружень матеріалу деталей при різних схемах деформування деталей типу втулок.

Основні переваги процесу роздачі деталей типу втулок як одного з методів розмірно-зміцнювальної обробки: кінематична простота схеми обробки: роздача здійснюється за рахунок осьового переміщення інструменту (пуансона); висока продуктивність процесу за рахунок високої швидкості роздачі: 1...30 м/хв. необхідний розмір можна отримати за один прохід інструменту, підвищивши точність обробленої втулки в 10-25 разів, що практично неможливо при застосуванні інших методів поверхнево-пластичного деформування (ППД); 4) шорсткість обробленої, зміцненої поверхні порівнянна з шорсткістю, що забезпечується на фінішних операціях обробки отворів [18]. До недоліків процесу роздачі втулок відносяться: - утворення залишкових напружень, сформованих в процесі роздачі; - зниження точності зовнішніх поверхонь деталей [19]. Роздача деталей типу втулок знижує трудомісткість обробки отворів приблизно в 2-4 рази, зменшує витрату матеріалу; на 15...30%, підвищує довговічність оброблених деталей [20]. Роздача широко використовується при ремонті зношених деталей: штоків гідроциліндрів, поршневих пальців двигунів внутрішнього згоряння, карданних валів, хрестовин та ін. Під впливом внутрішнього тиску деталей пластично деформується до необхідного розміру. Одночасно відбувається зміцнення металу. Тому дослідження внутрішніх

напружень в дослідних деталях є вкрай важливим для впровадження розробленої технології у виробництво.

У процесі роздачі відбувається зменшення товщини стінки і довжини заготовки в зоні пластичної деформації, яка охоплює ділянку зі збільшеними поперечними розмірами. При роздачі втулки в центрі деформації виникають і радіальні стискуючі та розтягуючі окружні напруження [20]. Формозміна заготовок оцінюється коефіцієнтом роздачі, показуючи собою відношення найбільшого діаметра деформованої її частини D_p до діаметру заготовки D [20, 21]:

$$K_p = \frac{D_p}{D} \quad (1.1)$$

У нашому випадку зона пластичної деформації охоплює ділянку заготовки зі змінним поперечним перерізом. А циліндрична її частина деформується пружно. Зовнішня частина заготовки не має навантаження від дії деформуючих сил. Зусилля, яке передає пуансон, у разі малої відносної товщини стінки невелике в порівнянні з напруженням текучості. Отже, можна вважати, що напружений стан при роздачі, характерний стисканням в осьовому і окружному напрямках нормальними напруженнями σ_r і σ_τ (рис. 1.1).

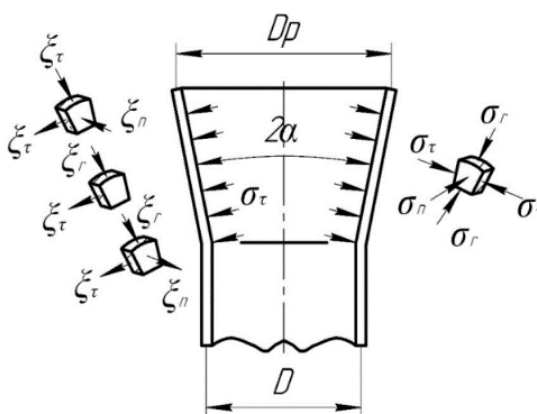


Рис. 1.1 Схеми деформованого і напруженого стану [20]

Залишкові внутрішні напруження умовно розділені на макронапруження і мікронапруження. Напруження від зовнішніх навантажень відносяться до

макронапружень. Велика кількість методів оцінки характеру розподілу і визначення величини залишкових напружень в металі деталей, застосовуються сьогодні, зокрема: метод Закса, рентгенівський метод, методи розточування та звільнення, метод отворів, голографічна інтерферометрія, електронна спекл-інтерферометрія [20, 21]. Усі вони мають високу точність, але вимагають застосування складного обладнання, дуже високої точності вимірювань і громіздких розрахунків.

Експерименти проводяться з використанням експериментальної установки деформування деталей [22]. Деформування виконували пуансонами з інструментальної вуглецевої сталі твердістю робочої поверхні 62...65 HRC. Пуансони мали різні кути (β) нахилу твірної конуса: 100, 110 та 120. Мащення здійснювали мастилом М-10Г2 з додаванням ПАВ – 4. Результати експериментів після математичної обробки дозволили отримати емпіричні залежності зусилля деформації від величини припуску на обробку, коефіцієнта деформації зразків-втулок по зовнішньому діаметру та значення кута нахилу твірної пуансона [23-24].

1.4 Аналіз базового технологічного процесу, обґрунтування та вибір оптимального методу відновлення поршневих пальців

Поршневі пальці відносяться до деталей, які необхідно відновлювати на великих централізованих підприємствах. Для відновлення поршневих пальців двигунів може бути використана технологія відновлення методом хромування. Спочатку поршневі пальці шліфують на безцентрово-шліфувальному верстаті для надання їм правильної геометричної форми. Промиті й висушені поршневі пальці монтують на підвіску [6-8]. Потім їх обробляють у ванні для електролітичного знежирення в електроліті, що містить 30–50 г/л їдкого натру, 50–70 г/л кальцинованої соди, 2–5 г/л рідкого скла. Режими електролітичного знежирення наступні: $t = 70\text{--}75^\circ\text{C}$; $D_k = 5\text{--}10 \text{ А/дм}^2$, $T = 3\text{--}5 \text{ хв}$. Промивають у гарячій ($70\text{--}80^\circ \text{C}$), а потім у холодній воді. Проводять анодне декапірування у

ванні для електролітичного декапірування в електроліті, що містить 100 г/л хромового ангідриду й 2–3 г/л сірчаної кислоти. Режим: $t = 50\text{--}60^\circ \text{C}$, $D_k = 8\text{--}10 \text{ А/дм}^2$, $T = 0,5\text{--}1$ хв. Після цього проводять хромування (у ванні МН-2-58Х-2-7) в електроліті, що містить 150–200 г/л хромового ангідриду й 1,5–2 г/л сірчаної кислоти. Режим: $t = 57^\circ \text{C}$, $D_k = 35\text{--}40 \text{ А/дм}^2$. Час T хромування визначається по формулі залежно від товщини покриття, що наноситься, й припусків на наступну обробку [10, 26]. Після хромування поршневі пальці промивають у дистильованій, а потім у холодній проточній воді. Обезводнювання виконують у сушильній шафі при температурі $150\text{--}180^\circ \text{C}$ впродовж 2–3 год. Заключні операції - шліфування, полірування й сортування пальців на розмірні групи по зовнішньому діаметру. Недолік способу відновлення поршневих пальців – висока трудомісткість, викликана необхідністю виконання великого обсягу попередньої підготовки відновлюваних поверхонь і наступної механічної обробки. Наявність підвищеної шкідливості гальванічних процесів вимагає створення ізольованих приміщень і очисних споруджень. Для вирішення цих проблем і пропонується спосіб відновлення поршневих пальців гідротермічною роздачею [20-23, 27]. Даний спосіб має можливість одержувати по перерізу деталі залишкові деформації достатні для компенсації величини спрацювання, дозволяє скоротити тривалість процесу відновлення, зменшити кількість браку та забезпечує і навіть перевищує якість поверхонь деталей в порівнянні з вище згаданим способом. При цьому фізико-механічні та експлуатаційні властивості відновлених деталей не тільки не поступаються новим, але й перевершують їх. При даному способі палець нагрівають вище точки A_{c3} і в подальшому його охолоджують потоком рідини [17, 28]. Це забезпечує утворення різниці швидкостей охолодження внутрішніх і зовнішніх шарів із подальшим збільшенням зовнішнього діаметра пальця при фіксації об'ємного розширення металу, який одержується під час нагрівання. Одночасно з роздачею проводять відповідно термічну обробку пальців – загартування та низький відпуск. Порядок проведення гідротермічної роздачі: Встановлений в індуктор поршковий палець нагрівають методом ЕКН на спеціальній гартівній установці

ЛПЗ-107 до температури 780...830°C протягом 20...25 с. - В подальшому палець затискають в установці для роздачі при цьому, через внутрішню порожнину пальця, пропускають охолоджуючу рідину під тиском 0,4...0,5 МПа протягом 14...16 с, що забезпечує охолодження пальця вцілому. В якості охолоджувальної рідини використовується звичайна водопровідна вода [7, 29-31].

1.5 Задачі досліджень

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні задачі: проаналізувати способи визначення внутрішніх напружень при деформуванні втулок, провести дослідження напруженого стану деталей при деформуванні конкретних зразків вибрати основні параметри процесу пластичного деформування відновлюваних деталей.

Висновки до розділу

Спосіб відновлення поршневих пальців нагріванням струмом високої частоти з наступним охолодженням внутрішньої поверхні, завдяки різниці швидкостей охолодження внутрішніх і зовнішніх шарів, забезпечує збільшення зовнішнього діаметру поршневих пальців за рахунок фіксації об'ємного розширення металу, отриманого при нагріванні.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПОРШНЕВОГО ПАЛЬЦЯ

2.1 Фізика процесу приросту зовнішнього діаметра поршневого пальця

Для з'ясування фізичної природи зміни геометричних розмірів поршневого пальця під час ЕКМ і комбінованого спрейерного охолодження використовуємо.

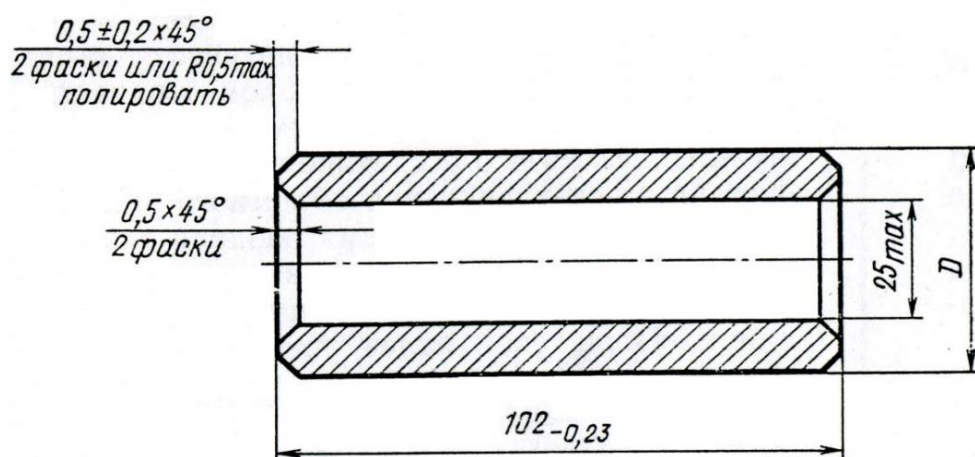


Рис.2.1 Схема зміни розмірів поршневого пальця під час електроконтактного нагрівання і комбінованого спрейерного охолодження:

$D_{вн.вих.}$ – вихідний внутрішній діаметр поршневого пальця; $D_{вн.відн.}$ – внутрішній діаметр поршневого пальця після ЕКМ і комбінованого спрейерного охолодження; $D_{вн.нагр.}$ – внутрішній діаметр нагрітого поршневого пальця; $D_{зовн.вих.}$ – вихідний зовнішній діаметр поршневого пальця; $D_{зовн.відн.}$ – зовнішній діаметр поршневого пальця після ЕКМ і комбінованого спрейерного охолодження; $D_{зовн.нагр.}$ – зовнішній діаметр нагрітого поршневого пальця; ΔD – зміна діаметра вихідного і відновленого поршневого пальця [7, 17].

Повний приріст діаметра поршневого пальця складається з двох компонентів:

$$\Delta D = \Delta D_p + \Delta D_f, \quad (2.1)$$

де ΔD_p – збільшення діаметру незворотною пластичною деформацією, що виникає при умові, коли температурні напруження забезпечують необхідний рівень, що відповідає границі текучості матеріалу [15, 32-33];

ΔD_f – приріст діаметра за рахунок фазових перетворень при загартуванні (високошвидкісний перехід аустеніт – мартенсит).

У відповідності з прийнятою моделлю процесів, що відбуваються в стінках циліндра, виходячи з тих обставин, коли виникаючі в процесі загартування градієнти температури і відповідні їм температурні напруження обумовили пластичну деформацію ΔD_p , яка відбувається за дуже малий проміжок часу $t_p \ll t_{ox}$ (t_{ox} – повний час охолодження). Тривалість фазових перетворень в стані (мартенситне перетворення) також дуже мала, тобто можна прийняти $t_f \leq t_p$ [8, 34].

Таким чином, внесок пластичної течії і фазових перетворень в приріст діаметру поршневого пальця реалізуються за дуже короткий проміжок часу. Процес високотемпературної повзучості розвивається достатньо повільно. Він виникає при будь – якому напруженні в матеріалі (непороговий процес) і протікає тим інтенсивніше, чим вища температура і більші напруження [35-38].

Знаходимо приріст радіусів a і b поршневого пальця за рахунок залишкової деформації.

В умовах пластичного стану матеріал можна вважати нестискаючим, тоді:

$$\xi = \text{div} \bar{u} = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} \approx 0. \quad (2.2)$$

$$\text{З рівняння } \sigma_{rr}^{(1)} = \frac{2\sigma_{T1}}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{a} \text{ (враховуючи граничну умову } \sigma_{rr}(a)=0, \sigma_{rr}(b)=0),$$

знаходимо:

$$\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr} = 2G(\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{rr}). \quad (2.3)$$

З іншого боку з виразів $\frac{\partial \sigma_{rr}^{(1)}}{\partial r} - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{T1}}{r} = 0$ (з урахуванням критерій виникнення пластичного стану: $\sigma_{\Theta\Theta} - \sigma_{rr} = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T$) і (1.2) випливає, що в області пластичності:

$$u_1 = \frac{A_1}{r}, \quad (2.4)$$

де A_1 – деяка стала, яку можна визначити з рівняння (2.2), поклавши $r=r_{p1}$:

$$A_1 = \frac{r_{p1}^2 \sigma_{T1}}{2\sqrt{3}G_1}, \quad (2.5)$$

де σ_{T1} і G_1 – границя текучості і модуль зсуву відповідно для області, що примикає до внутрішньої границі поршневого пальця (область зниженої температури) [39].

Аналогічні міркування приводять до виразів характерних областях, що примикають до зовнішньої границі поршневого пальця:

$$u_2 = \frac{A_2}{r}; \quad A_2 = \frac{r_{p2}^2 \sigma_{T2}}{2\sqrt{3}G_2}. \quad (2.6)$$

У відповідності з (1.4) і (1.5) маємо прирости внутрішніх та зовнішніх діаметрів:

$$\Delta D_{вн} = 2u_1(a) = \frac{r_{p1}^2 \sigma_{T1}}{\sqrt{3}G_1 a}; \quad (2.7)$$

$$\Delta D_{pd} = 2u_2(b) = \frac{r_{p2}^2 \sigma_{T2}}{\sqrt{3}G_2 b}. \quad (2.8)$$

Для границі текучості σ_T можна використати співвідношення:

$$\sigma_T = A \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T_{nl}}{T}, \quad (2.9)$$

де $E=2(1+\nu)G$ – модуль Юнга;

ρ – густина матеріалу;

A – розмірна стала.

Проведемо оцінку величини зміни розмірів трубчастого тіла з досліджуваної сталі. Нехай $T_b - T_a = 400\text{K}$; $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$; $E = 2,0 \cdot 10^{11}\text{ Па}$; $\sigma_T = 440\text{МПа}$; $a = 14\text{мм}$; $b = 23\text{мм}$.

$$\text{З виразів } G = \frac{\alpha E(T_a - T_b)}{(1-\nu)} \text{ і } \frac{(T_b - T_a)\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\frac{2\left(\frac{a}{r_p}\right)}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} - \frac{1}{\ln \frac{b}{a}} \right] = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \text{ випливає:}$$

$$G = 80\text{ГПа}; r = 16\text{мм}; r_{p2} = 20,3\text{мм}.$$

Зазначимо, що оцінки виконані без врахування зміни границі текучості вздовж радіальної координати. В цих припущеннях маємо $\Delta D_{зв} \approx 0,07\text{мм}$, за експериментом - $\Delta D_{зв} \approx 0,1\text{мм}$ [40].

Розглянемо вплив температури на відношення приростів внутрішнього та зовнішнього діаметрів при запропонованому способі поршневих пальців, використовуючи рівняння (1.6)-(1.8):

$$\delta = \frac{\Delta D_{\text{вн}}}{\Delta D_{\text{зовн}}} = \left(\frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right)^2 \left(\frac{E_1 \rho_1}{E_2 \rho_2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T_1 a}{T_2 b}. \quad (2.10)$$

Якщо $r_{p1} \approx 16\text{мм}$, $r_{p2} \approx 20,3\text{мм}$, $T_1 \approx 400\text{K}$, $T_2 \approx 1100\text{K}$, то отримуємо $\delta \approx 0,41$ за експериментальними даними – $\delta = 0,45$.

Ефект розвантаження від температурних напружень при $T_b - T_a \rightarrow 0$, може бути враховано наступним чином для додаткових приростів радіусів a і b :

$$\Delta u_1(a) = \int_0^{\tau} \frac{r_{p1} \sigma_{T1}}{\sqrt{3} G_1} dr_{p1} = - \frac{r_{p1} \sigma_{T1}}{a \sqrt{3} G_1} (r_{p1} - a); \quad (2.11)$$

$$\Delta u_2(b) = \frac{r_{p2} \sigma_T}{a \sqrt{3} G_2} (b - r_{p2}), \quad (2.12)$$

де τ – час розвантаження, протягом якого $r_{p1} \rightarrow a$; $r_{p2} \rightarrow b$ при $T_b - T_a \rightarrow 0$.

Висновки по розділу

На основі теплової моделі електроконтактного нагрівання і гідравлічної моделі охолодження трубчастих виробів з цементованої сталі, а також дослідження процесів залишкової деформації встановлене наступне:

1. Отримані вирази для приростів зовнішнього і внутрішнього діаметрів трубчастого тіла, що враховують фізико-механічні характеристики матеріали (2.7, 2.8), співвідношення між ними (2.10) та величини залишкової деформації після охолодження (2.8, 2.12).

2. Показано, що збільшення зовнішнього діаметру поршневого пальця відбувається за рахунок незворотної пластичної деформації і за рахунок фазових перетворень при загартуванні (високошвидкісний перехід аустеніту в мартенсит).

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Дослідження структури та властивостей матеріалу відновлених поршневих пальці

Дослідження показали, що від умов нагрівання і охолодження залежить як величина роздачі так і якість поршневого пальця.

Мікроструктура загартованого цементованого шару поршневого пальця являє собою дрібногочастий мартенсит не вище 4 балу з рівномірно розподіленими включеннями, цементиту, залишкового аустениту та троститу (рис. 3.1, 3.2) [3, 7, 41].

В мікроструктурі серцевини знаходяться окремі включення фериту (рис 1.2).

Кількість залишкового аустениту не перевищує 18% для оптимальних режимів відновлення ТО запропонованим способом, що узгоджується з ГОСТ 619-79 [1, 5, 7, 42].

Глибину загартованого цементованого шару визначали як за мікротвердістю, так і за мікроструктурою. Товщина загартованого шару склала 1,2...2,0 мм.

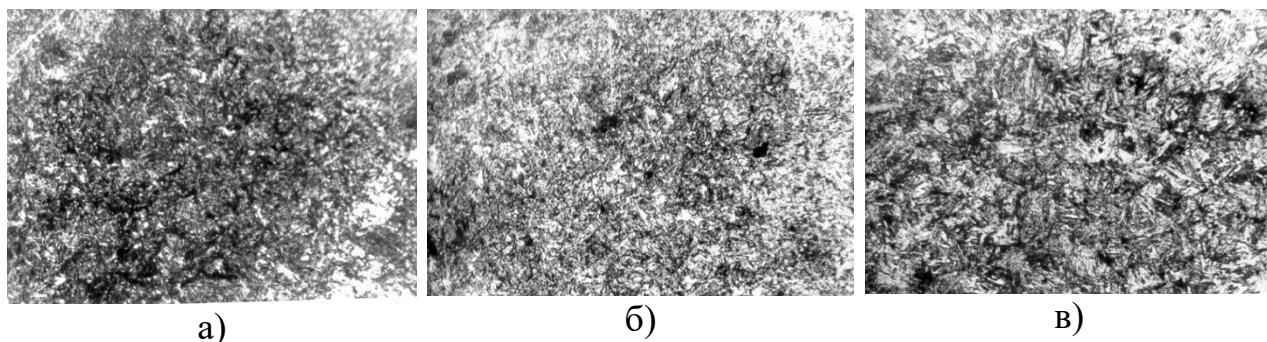


Рисунок 1.2. Мікроструктура загартованого цементованого шару поршневого пальця після ЕКН і комбінованого спреїєрного охолодження: а) поверхневий шар; б) перехідна зона; в) серцевина [7]

Для порівняння поршневих пальців на рис. 3.3, 3.4 наведено мікроструктури поверхневих загартованих цементованих шарів різними способами відновлення [15, 20, 43].

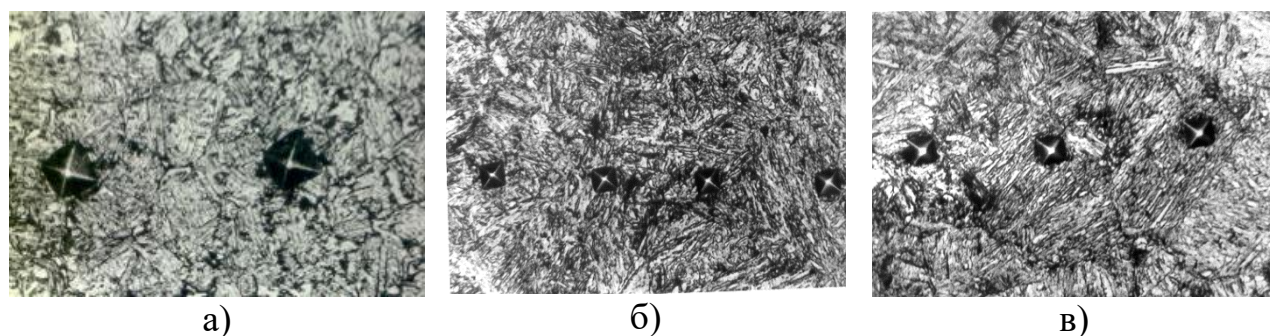


Рис. 3.2 Мікроструктура загартованого цементованого шару поршневого пальця після ЕКН і комбінованого спрейерного охолодження з вимірюванням мікротвердості: а) поверхневий шар; б) перехідна зона; в) серцевина [7]

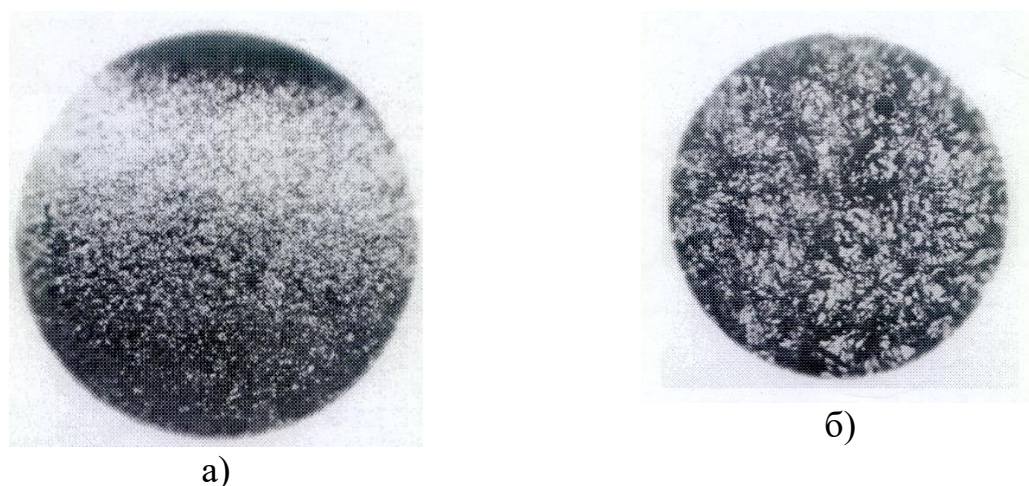


Рис. 3.3 Мікроструктура загартованого цементованого шару з нагріванням ЕКН і комбінованим спрейерним охолодженням: а) $\times 120$; б) $\times 440$ [7]

Для зменшення кількості залишкового аустеніту в мікроструктурі загартованого цементованого шару доцільно після ЕКН і комбінованого спрейерного охолодження проводити обробку холодом до повного перетворення аустеніту в мартенсит [17, 23, 27, 44].

Рациональну температуру при ЕКН і комбінованому спрейерному охолодженні поршневого пальця, що відповідає задовільній якості робочої поверхні і передбачає отримання оптимального припуску на механічну обробку,

слід шукати в інтервалі 1103...1163 К.



Рис. 3.4 Мікроструктура загартованого цементованого шару з нагріванням СВЧ і проточним охолодженням: а) $\times 120$; б) $\times 440$ [7]

Вивчення структури відновлених поршневих пальців проводиться на мікрошліфах, вирізаних з найбільш характерних зон, що підлягають максимальному спрацюванню. Неоднорідності структури по перерізу поршневого пальця виявляються на поперечних шліфах [45].

Дані металографічного аналізу наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Результати металографічного аналізу

№ зразків	Характеристика мартенситу	Бал	Вміст залишкового аустеніту, %, γ
1	<u>Дрібно- і середньогольчастий</u>	4-3	26
2	Середньогольчастий	6-7	25
3	Дрібногольчастий	4	24
4	Середньогольчастий	5	23
5	Середньогольчастий	4	22
6	Дрібногольчастий	до 4	20
7	Дрібногольчастий	до 4	18

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що стабільно переважні структури і фазовий склад отримуються в результаті обробки, яка проводиться при температурі нагрівання 820...830 °С, швидкість охолодження

поверхні 1600...1800 К/с, тривалість нагрівання $t_n = 12$ с, тривалість охолодження $t_{ox} = 16$ с, після 12 с нагрівання вмикається внутрішній спреєр, після 4 с його роботи вмикається зовнішній спреєр.

Представлені фотографії показують, що структури металу поршневого пальця відповідають вимогам ГОСТ 619-79. Цементований шар являє собою мартенсит не вище 4-го класу і має тенденцію до подрібнення зерна без утворення в процесі термообробки карбідної (цементитної) сітки. Внутрішні шари також мають тенденцію до подрібнення зерна, тобто до покращення вихідної структури [20, 38, 39, 46].

Таблиця 3.2

Результати дослідження фазового складу зразків

Зразки	Місце зрізу	Відсотковий вміст залишкового аустеніту, %, γ	Ширина лінії В, ряд
1	Робоча поверхня	24	0,07272
1	Серцевина	18	0,03127
2	Робоча поверхня	18	0,03127
2	Серцевина	-	0,06254
3	Робоча поверхня	21	0,06672
3	Серцевина	-	0,04108
4	Робоча поверхня	20	0,06421
4	Серцевина	-	0,04503

Дані наведені в таблиці 3.2 при вибраних режимах, говорять про те, що даний вид термічної обробки являє собою різновид циклічного електротермічного покращення структури, яке полягає в подрібненні зерна (голок мартенситу) як поверхневих, так і внутрішніх шарів, подрібненні і більш рівномірному розподіленні карбідів і збільшені мікротвердості мартенситних кристалів. Про протікання цих процесів свідчить зростання мікротвердості поверхневих шарів поршневого пальця [4, 7, 18, 40].

Дослідження у характеристичному рентгенівському випромінюванні (рис. 3.5, а і б) показало, що при нагріванні СВЧ (рис. 3.5, б)



Рис. 3.5 Розподіл концентрації вуглецю в сталі 12ХН3А, поданий у характеристичному рентгенівському випромінюванні: а) – зразок вирізаний з поршневого пальця, відновленого ЕКН і комбінованим спреєрним охолодженням; б) – зразок вирізаний з поршневого пальця, відновленого СВЧ з проточним охолодженням [7]

Спостерігається як розчинення карбідів, так і вигорання вуглецю у поверхневих шарах, у той час як при ЕКН спостерігається тільки розчинення карбідів. Це підтверджує і оже-спектральний аналіз (Рис. 3.6), проведений за глибиною цементованого шару сталі 12ХН3А [15].

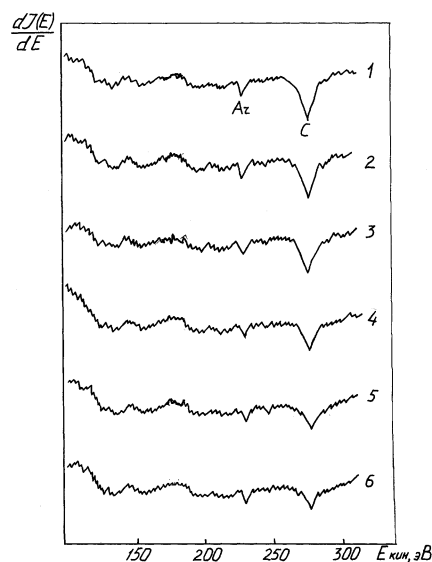


Рис. 3.6 Ділянки оже-спектрів, знятих за глибиною цементованого шару зразка, вирізаного з поршневого пальця відновленого запропонованим способом (Розгортка 500 еВ, крок 0,2 мм, $E_p = 5000$ еВ, $I_p = 8$ мкА, діаметр зонду 5 мкм).

3.2 Твердість та мікротвердість робочої поверхні матеріалу поршневих пальців

В процесі експериментальних досліджень встановлено, що твердість робочої поверхні поршневого пальця після відновлення методом електроконтактним нагріванням і комбінованим спреєрним охолодженням знаходиться в межах 59...64 HRC, що відповідає вимогам ГОСТ 619-79. Твердість зовнішньої циліндричної поверхні нових поршневих пальців склала HRC 59...60, відновлених ГТР – HRC 59...62, відновлених електроконтактним нагріванням і комбінованим спреєрним охолодженням – HRC_e 60...64 [3, 27, 47].

Зміна мікротвердості за глибиною цементованого шару наведена на рис. 3.7.

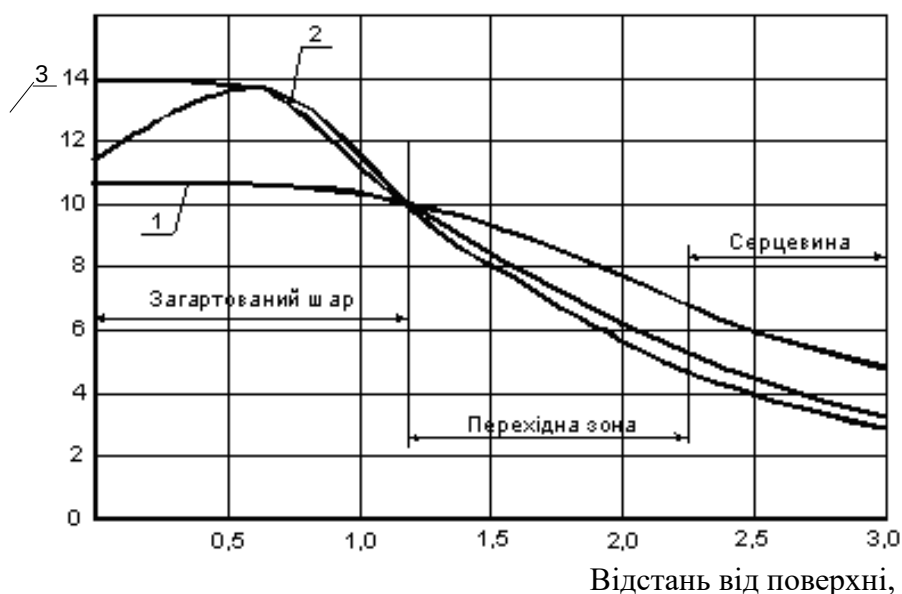


Рис. 3.7 Розподіл мікротвердості загартованого цементованого шару вздовж радіуса відновленого поршневого пальця: 1 – нові; 2 – після ГТР; 3 – запропонованим способом.

Глибина загартованого шару складає 1,1...1,6 мм. Величина мікротвердості при відновленні поршневого пальця методом ГТР більша на

6...8%, а застосування обробки холодом – більша на 12...15% від величини мікротвердості поршневого пальця відновлених ГТР з індукційним нагріванням. Спостерігається аналогічне збільшення й товщини загартованого шару [14].

3.3 Внутрішні напруження матеріалу

Регулювання рівня залишкових напружень при удосконаленні технологічного процесу відновлення поршневих пальців термопластичним роздаванням є важливим резервом підвищення довговічності деталей [18].

Результати досліджень залишкових напружень в радіальному напрямку відновлюваного пальця подані на рис. 3.8 На рисунку наведена сумарна крива розподілу залишкових напружень по перерізу поршневого пальця [32, 33].

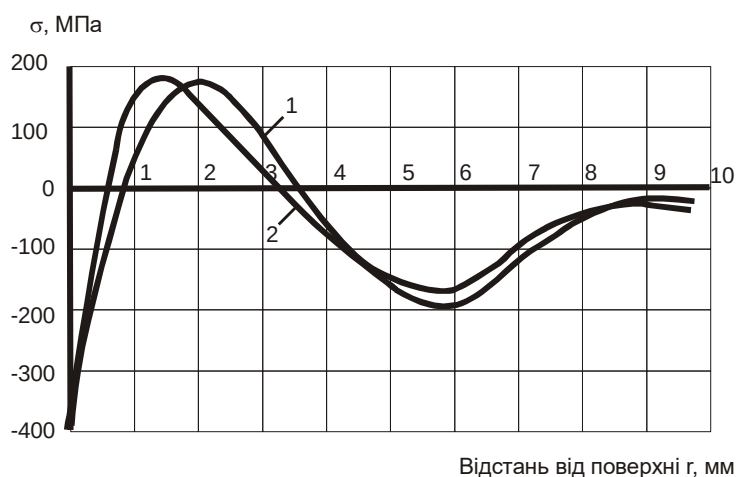


Рис. 3.8 Епюра розподілу залишкових напружень в поршковому пальці відновлених запропонованим способом: 1 – теоретична крива; 2 – експериментальна крива.

Отримані дані показали, що на поверхні виникають стискуючі залишкові напруження порядку 400 МПа, які швидко переходять в поверхневі розтягуючі напруження порядку 200 МПа. На глибині біля 4 мм залишкові напруження знову переходять в стискуючі досягаючи величини 150 МПа і на внутрішній поверхні поршневого пальця знижується майже до нуля [47, 48].

Причиною виникнення залишкових напружень є неодночасна зміна

питомого об'єму металу внаслідок нерівномірного нагрівання й охолодження. Зміна питомого об'єму металу відбувається в процесі відновлення поршневих пальців ТО за двома причинами:

- через лінійне розширення й стиску за рахунок зміни температури;
- внаслідок структурних перетворень в металі.

Теплові напруження, які викликані нерівномірним розподілом температури, виникають на початку процесу нагрівання, але коли метал в нагрітому шарі стає пластичним, вони повністю зникають, оскільки відбувається пластична деформація нагрітого металу.

При різкому спреїєрному охолодженні поршневі пальці зовнішній шар внутрішньої поверхні починає швидко скорочуватися в об'ємі. Тому скороченню будуть протидіяти глибинні сусідні шари, які охолоджуються повільніше. В результаті в серцевині виникають напруження стиску. Зовнішні шари внутрішньої поверхні, в свою чергу будуть підлягати напруженню розтягу. Поршневі пальці охолоджуються неодноразово по всьому перерізі, тому характер розподілу напружень по мірі охолодження змінюється. Наступає момент, коли зовнішній шар внутрішньої поверхні стає "холодний" і перестає скорочуватися в розмірах, а більш далекий глибший шар металу продовжує охолоджуватися й скорочуватися [11-15]. Скорочений шар буде стягувати внутрішній холодний метал, створюючи в ньому розтягуючі напруження. Під впливом охолодження глибших шарів в поверхневому цементованому шарі виникають розтягуючі напруження. Напруження, викликані структурними перетвореннями, виникають при охолодженні в момент перетворення аустеніту в мартенсит, оскільки це перетворення протікає зі збільшенням об'єму. Утворення мартенситу відбувається при зниженні температури цементованого поверхневого шару нижче 350 °С. При цьому загартовані шари збільшуються в об'ємі. Однак збільшенню об'єму перешкоджає зв'язок шару з серцевиною. Загартований шар з боку серцевини зазнає напружень стиску, серцевина при цьому розтягується.

Таким чином, процес утворення мартенситу по мірі охолодження при ТО розвивається не в глибину як при загартуванні, а до зовнішньої поверхні. При

цьому початковий розподіл залишкових напружень буде змінюватися. Збільшення об'єму металу в загартованих шарах викликає появу стискуючих напружень. Слід зазначити, що дія об'ємних змін, обумовлених градієнтом температури, протилежна за знаком від дії викликаного градієнтом структурних перетворень [45]. Разом з тим збільшення об'єму, обумовлене охолодженням, відбувається в усьому нагрітому шарі, а збільшення об'єму в наслідок структурних перетворень відбувається лише в цементованому поверхневому шарі, значно меншому за глибиною. Окрім цього, ці зміни в часі і мартенситне перетворення відбувається при температурі нижчої за 350 °С, коли сталь вже мало пластична. Тому після повного охолодження залишкові напруження в загартованому шарі залишаються стискуючими. Загальна картина розподілу залишкових напружень в поршневому пальці при ТО представлена на рис. 3.10 [2, 3, 7, 40].

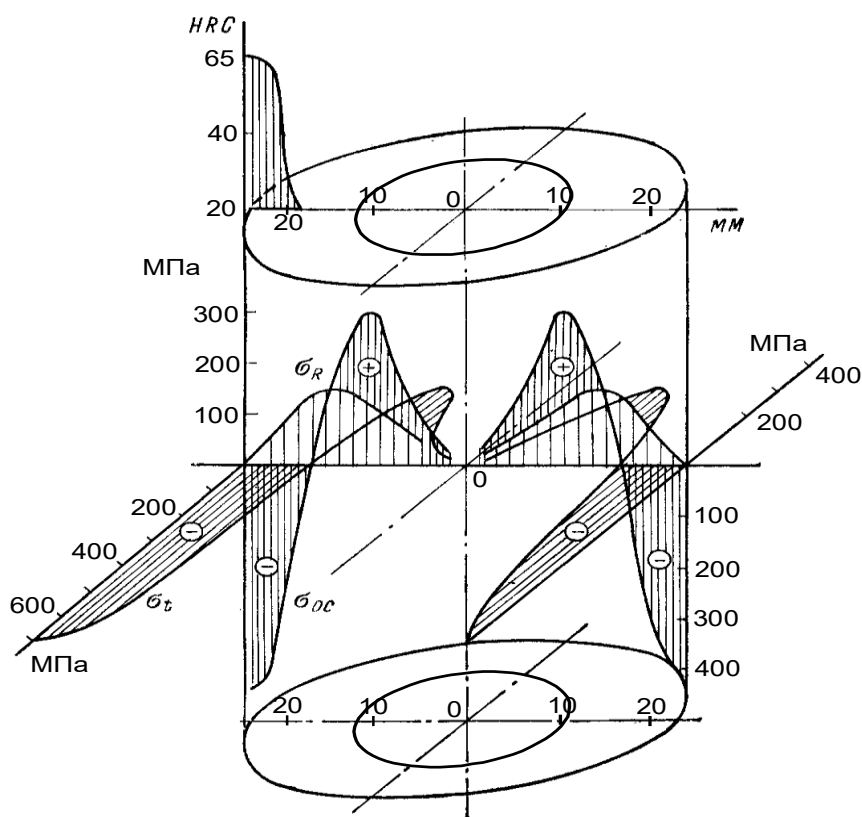


Рис. 3.9 Розподіл трьох головних векторів залишкових напружень в поршневому пальці після ЕКН і комбінованого спреєрного охолодження

Таким чином, величина і розподіл залишкових напружень залежать від багатьох факторів: твердості і глибини загартованого шару; режиму нагрівання й охолодження, якості матеріалу, розподілу загартованого шару на поверхні виробу [15].

При розрахунках за формулами, було отримане цілком задовільне співпадання розрахункових і експериментальних кривих залишкових напружень [20].

3.4 Дослідження зносостійкість поршневих пальців

Зносостійкість зразків, виготовлених з поршневих пальців двигунів, визначалось на машині тертя СМЦ-2. Випробуванням підлягали пари зразок – контрзразок. Зразки були виготовлені як з відновлених, так і з нових ПП двигунів (сталі 12ХН3А з зовнішнім цементованим шаром). Всі контрзразки виготовлювались з бронзи БрОЦС-5-5-5. За результатами зважування зразків і контрзразків до і після випробування визначали середню втрату маси ΔM і Δm , а потім питомий знос I_d зразків і контрзразків за якими оцінювалась інтенсивність зношування. Результати досліджень наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати лабораторних випробувань відносної зносостійкості ($1/I_{В/Н}$) зразків нових і відновлених ГТПР деталей (ПП двигуна СМД - 62).

Найменування деталі	Інтенсивність зношування $I_d \cdot 10^6$ кг/м ² км				
	нових	ГТПР	$1/I_{В/Н}$	ГТПР	$1/I_{В/Н}$
Поршневий палець	18	15	1,2	14	1,3
Втулка верхньої головки шатуна	24	22	1,2	20	1,2

Результати досліджень порівняльної зносостійкості зразків нових і відновлених поршневих пальців подані на рис. 3.10 і 3.11.

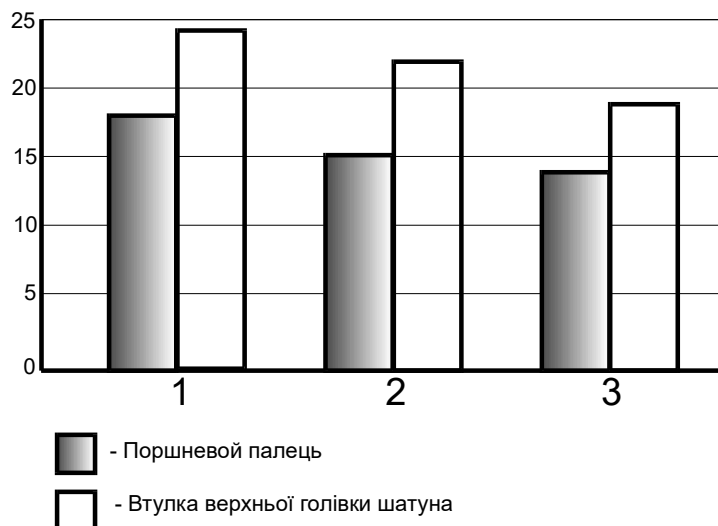


Рис. 3.10 Зносостійкість спряження “поршневий палець – втулка верхньої голівки шатуна”. Середній знос зразків поршневого пальця: 1 – нового; 2 – відновлення ТПР з нагріванням ТВЧ; 3 – відновлення ТПР з ЕКН.

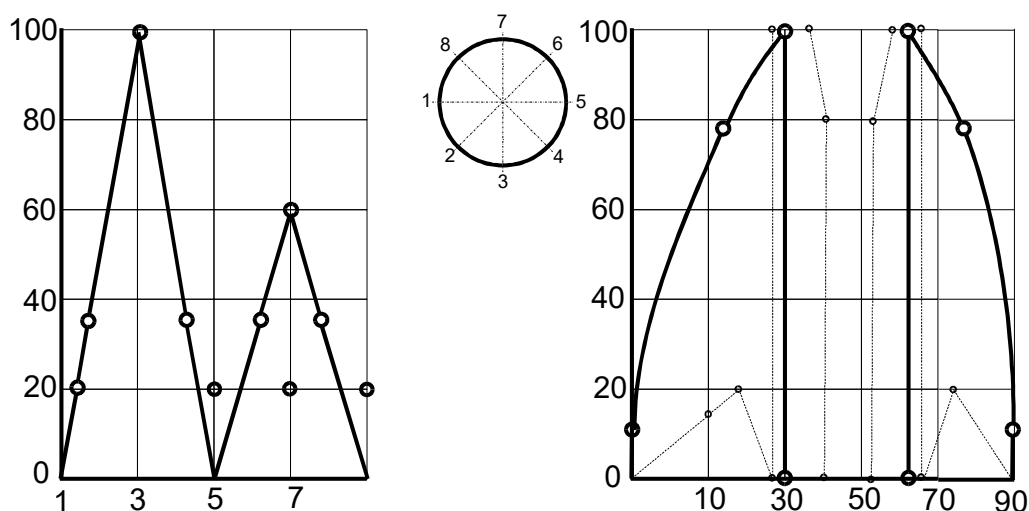


Рис. 3. 11 Криві зносу поршневого пальця дизельних двигунів: 1 – при нагрівання СВЧ і проточному охолодженні; 2 – при нагріванні ЕКН і комбінованому спреєрному охолодженні.

З рис. 3.11 видно, що поршневі пальці зношуються нерівномірно. Нерівномірність зносу пояснюється зміною розподілу тиску протягом циклу роботи двигуна і деформацією деталей. Область найбільшого зносу поршневого пальця співпадають з напрямком тиску в тактах розширення с стиску [29]. Аналіз приведених залежностей показав, що зносостійкість поршневого пальця, відновлених запропонованим способом з ЕКН, не нижча зносостійкості нових.

Отриманий результат можна пояснити підвищенням твердості робочої поверхні і стискуючими залишковими напруженнями на поверхні загартованого шару. Зносостійкість контрзразків, що працюють в парі з відновленими поршневого пальця, не нижче зносостійкості зразків, що працюють в парі з новими. Зменшення величину зносу контрзразків, що працюють в парі з відновленими зразками, можна пояснити зменшенням схильності до схоплення. Оскільки на поверхні відновлених зразків відсутні мікротріщини. Отримані результати свідчать про високі експлуатаційні властивості відновлених поршневих пальців запропонованим методом [15, 32, 47].

3.5 Визначення механічної міцності

Для порівняння ефективності запропонованої технології відновлення поршневих пальців ГТПР проведені дослідження їх механічної міцності.

Характеристикою міцнісних властивостей поршневого пальця згідно з ГОСТ 619-79 є зусилля навантаження до появи тріщин в деталі, що розміщена на призмі з кутом 90° , при натискуванні на неї зверху площиною [26, 37].

Результати випробувань наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Порівняльна міцність поршневих пальців двигунів СМД-62

№ зразків	Руйнівне навантаження на зминання ПП, кН		
	Нових	відновлених ГТР з нагріванням СВЧ	відновлених ГТПР з нагріванням ЕКН
1	560	620	680
2	590	590	680
3	600	610	640
4	610	600	670
5	600	610	650
6	560	620	660
7	600	590	650
8	610	580	660
9	590	600	650
10	600	620	640
Середнє значення	590	605	660

Дані таблиці 1.4 показують, що при відсутності тенденції до монотонного зниження величини навантаження, при якому починається розтріскування зразків, зусилля зминання пальців, відновлених ТПР з індукційним нагріванням (на 0,9%) і ГТПР з ЕКН (на 2,5%) є декілька вище, ніж для нових деталей. Величина руйнівного зусилля перевищує допустиме значення, що дорівнює 590кН [26].

Висновки до розділу

Проведені дослідження вказують на можливість застосування запропонованого методу відновлення і зміцнення деталей з цементованих марок сталей машин типу «порожній циліндр».

При відновленні деталей величина залишкової деформації повинна компенсувати їхній знос і припуски на наступну механічну обробку.

Для повного відновлення поршневих пальців двигунів СМД–60, 62, ЯМЗ-236 необхідно, щоб залишкова деформація по діаметрам пальця складала 0,12 мм.

Відновлення і зміцнення зовнішньої циліндричної поверхні поршневих пальців автотракторних дизелів, що виготовляються з цементованої низьковуглецевої сталі 12ХНЗА, доцільно проводити способом створення градієнта температури по радіусу поршневого пальця при комбінованому охолодженні як зовнішнім так і внутрішнім спреєрами після рівномірного об'ємного нагрівання. Причому нагрівання пальців здійснюють до температури фазових перетворень.

Експериментально підтверджено теоретичні обґрунтування напружено-деформованого стану при відновленні поршневих пальців запропонованим способом.

Установлено, що виникаюча при відновленні поршневих пальців корсетоподібність є наслідком залишкових осьових напружень стискування, а діжкоподібність – осьових залишкових напружень розтягу.

Методом математичного планування експерименту визначено оптимальні режими відновлення: температура нагрівання 820...830°C; швидкість охолодження внутрішньої циліндричної поверхні 1600...1800град/с.; швидкість охолодження зовнішньої поверхні.

Поверхнева твердість поршневого пальця після ЕКН і комбінованого спреїєрного охолодження складає 56...64 HRC. Металографічні дослідження показали, що мікроструктура загартованого цементованого шару поршневого пальця являє собою дрібногольчатий мартенсит з рівномірно розподіленими включеннями цементиту, залишкового аустеніту і трооститу. Товщина загартованого шару склала 1,1...1,6 мм.

Зносостійкість поршневих пальців, відновлених запропонованим на 10...15 % вище зносостійкості нових деталей, а міцність не поступається новим поршневим пальцям.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці визначається специфікою діяльності ремонтного підрозділу, але в будь-якому випадку необхідно чітко дотримуватись вимог стосовно ведення документації, проведення інструктажів, контролю відповідності регламентованих параметрів, виконання заходів, спрямованих на покращення стану безпеки життєдіяльності. Що стосується основних вимог для проектованої ділянки, то вони визначаються технологічним процесом і можуть бути сформульованими наступним чином. Під час заїзду трактора на пост в напрямку його руху ніхто не повинен не повинен знаходитись. Відразу після заїзду трактора двигун повинен бути вимкнений і відключена акумуляторна батарея. Під задні колеса необхідно встановити опори з обох боків і перевірити чи немає підтікання і мастила. Після піднімання передньої частини трактора потрібно відразу поставити підставки. Оглядомі ями за межами автомобілів потрібно накрити настилами. Під час перевезення передніх мостів на візках з гідрокраном не допускається знаходитись в зоні можливого опускання моста і стріли. Під час виїзду трактора прогрів двигуна можна проводити лише за умови використання відсмоктувального рукава, закріпленому на випускному трубопроводі [49].

4.1 Характеристика і аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути під час ремонту та відновлення двигунів

Умови предметної діяльності в будь-якій галузі господарства мають велике значення для всі виробничих показників: продуктивність праці, якість роботи, безпеки працюючих та інше.

Підприємство має свою специфіку щодо умов праці, яка пов'язана з місцевими особливостями, з рівнем технічної оснащеності структурних підрозділів та особливостями технологічного процесу. Тому аналіз умов праці має на меті виявлення небезпечних та шкідливих чинників, які є характерними

для конкретного виробничого процесу, робочого місця, вивчення їх впливу на стан здоров'я та працездатність людини.

Аналіз умов праці здійснюємо, враховуючи такі фактори: рухомі машини та механізми; не захищені рухомі елементи виробничого обладнання; вироби, заготовки, матеріали, що переміщуються; підвищення запиленості та загазованості повітря робочої зони; підвищення або зниження температури поверхні обладнання, матеріалів, повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищену або понижену відносну вологість; небезпечний рівень напруги в електричному ланцюгу, замикання якого може пройти через тіло людини; відсутність або нестача природного світла; понижена контрастність; прямий або відбитий блиск; підвищена пульсація світлового потоку; нервово-психічні навантаження. Перелічені фактори відносяться до небезпечних та шкідливих. Вони проявляються раптово або поступово. Раптове виникнення небезпеки супроводжується травматичними наслідками-виробничими травмами. Поступовий вплив небезпечних факторів спричиняє професійні або хронічні отруєння [50].

Під час технологічного процесу миття деталей виникають наступні небезпечності та шкідливості:

- небезпека розсіювання, та як наслідок травми через наявність на робочому місці підвищених температур;
- небезпека враження електричним струмом;
- небезпека зіткнення та тривалий контакт шкіряних покривів з нафтомаслопродуктами, що може призвести до враження шкіри;
- небезпека тривалого вдихання шкідливих парів мийних розчинів, що призводять до отруєння органів дихання та професійних захворювань.

На ділянці термопластичного роздавання поршневіх пальців при виконанні технологічних операцій та експлуатації обладнання можуть мати місце наступні небезпечності і шкідливості:

- враження електричним струмом внаслідок пошкодження ізоляції струмоведучих елементів;

- отримання опіків шкіри внаслідок контакту з розігрітим матеріалом деталі;
- враження органів дихання шкідливими газами, що виділяються під час нагрівання деталей.

На механічній дільниці під час експлуатації обладнання виникають наступні небезпечності та шкідливості: внаслідок неправильного закріплення деталей та інструменту можливе отримання механічної травми робітником; враження електричним струмом внаслідок пошкодження електроізолюючих обмотки струмоведучих частин верстатів та обладнання; розрив шліфувальних кругів та поранення робітників їх уламками; підвищений рівень вібрації; висока запиленість повітря абразивними частинками.

При експлуатації підйомно-транспортного обладнання та виконання навантажувально-розвантажувальних робіт виникають наступні небезпечності та шкідливості:

- небезпека травм пов'язаних з падінням та перевертанням вантажів, що викликано застосуванням нестандартних, випадкових пристосувань для кантування вантажу;
- отримання обслуговуючим персоналом травм внаслідок порушення правил експлуатації обладнання, перевищення меж вантажопідйомності або габаритів вантажу;
- враження електричним струмом внаслідок пошкодження ізоляції струмоведучих частин електроустановок [51].

4.2 Розробка організаційно-технічних заходи по забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці під час ремонту та відновлення двигунів

Заходи щодо безпеки і поліпшення умов праці на галузевих об'єктах розробляються службами охорони праці за основними напрямками господарської діяльності.

Всі заходи щодо охорони праці включаються в колективний договір і угоду з охорони праці між адміністрацією і профспівковою організацією.

В умовах галузі основною формою планування охорони праці є комплексний план поліпшення умов праці і санітарно-оздоровчих заходів.

Планувальні заходи комплексного плану з охорони праці передбачають такі пункти: Перспективність. Вибір основного напрямку. Елементи безперервності.

Перспективність комплексного плану означає розробку заходів з охорони праці в умовах галузі на п'ять років.

Вибір основних напрямків передбачає визначення першочергового розподілення матеріальних, трудових і матеріальних ресурсів галузевого об'єкту.

Безперервність планування передбачає відповідну зміну перспективних комплексних планів, коли з часом виявляються неврахованими чинники, що можуть впливати на виробничу діяльність.

На ділянці термопластичного роздавання необхідно дотримуватись наступних основних заходів направлених на забезпечення безпечних умов праці працівників:

- все обладнання на ділянці повинно бути оснащене струмоприймачами, заземлене контуром, загальний опір струму, що розтікається не повинно перевищувати 40ОМ; вимикачі забезпечені захисним контуром, неізолювані струмоведучі частини електропроводки огороження;
- всі рухомі механізми пристосування для термопластичного роздавання оснащенні захисними кожухами.

Обладнання для термопластичного роздавання відповідає вимогам ГОСТ 12.2.003-83.

З метою попередження вражень електричним струмом на виконано наступні заходи: вимикачі обладнанні захисними кожухами; плавкі запобіжники встановлені в захисних шафах; неізолювані струмоведучі частини електропроводу огорожені, причому відстань від струмоведучої частини до

огорожі не менше 0,6 метра. На ділянці здійснюється періодична перевірка контуру заземлення та опору ізоляції, виконується перевірка заземлення та занулення електрообладнання згідно з вимогами ССБТ по ГОСТ 12.1.030-81, забезпечено неможливість випадкового доторкання до струмоведучих машин. З метою забезпечення безпечного рівня проведення робіт і недопущення нещасних випадків при виконанні механічної обробки деталей на ділянці проводяться наступні заходи: при виконанні шліфувальних операцій перед встановленням абразивного круга перевіряють його цілісність, відсутність тріщин, проводять його балансування, працівникам працюючих на шліфувальних верстатах для захисту шкіряного покриву від контакту з охолоджуючою рідиною видають захисні мастила та пасти для захисту шкіри рук, встановлення та закріплення деталей виконується при повній зупинці обладнання і по правилах кріплення згідно з ГОСТ 12.2.009-80. Організація робочих місць навантажувально-розвантажувальної ділянки відповідає нормам ГОСТ 12.3.025-80 та виконана за досягненнями сучасної ергономіки. На ділянці проведені необхідні заходи по забезпеченню безпеки при експлуатації технологічного обладнання по ГОСТ 12.2.009-80. Електрообладнання має захист заземлення замкнутим контуром по ГОСТ 12.1.030-81. Підйомно-транспортне обладнання, вантажні троси і канати проходять періодичні випробування на міцність згідно з вимогами ГОСТ 12.1.009.83 [10].

4.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час ремонту та відновлення двигунів

Технологічний процес заміни вузлів і агрегатів включає наступні операції [50-52]: миття і очищення деталей агрегатів і вузлів та кріпильних деталей; виконання допоміжних операцій для створення доступу до вузлів, що потребують заміни; готування і встановлення технологічного обладнання; виконання основних операцій заміни агрегатів і вузлів; контроль технічного стану агрегатів, вузлів та деталей; транспортування знятих вузлів деталей для їх

заміни. У процесі виконання вище перелічених операцій можуть виникати такі травмонебезпечні ситуації [50-52]: під час миття, очищення деталей та зливання технологічних робочих матеріалів: розбризкування мийного розчину або технологічних матеріалів і попадання їх на обличчя, руки та інші відкриті ділянки тіла; загоряння мийного розчину на основі горючих матеріалів або технологічних рідин; забруднення робочого місця; під час виконання допоміжних операцій для створення доступу до агрегатів і вузлів, що потребують заміни: наявність на деталях відколи, зазубрин і стружки; падіння деталей і складальних одиниць; зіскакування ключів з граней гайок; підготовка і встановлення технологічного обладнання: намотування одягу на обертові деталі обладнання (силовий гвинт); затискання одягу або частин тіла елементами обладнання, падіння, перекидання обладнання; наїзд мобільним обладнанням на перешкоди, виконавців робіт або на інших присутніх осіб; виконання основних операцій заміни агрегатів і вузлів: наявність на деталях відколи, зазубрин і стружки; зіскакування ключів з граней гайок; падіння деталей і складальних одиниць; - під час виконання основних операцій заміни агрегатів і вузлів: зіскакування ключів з граней гайок; наявність на деталях гострих кромek і відшарування металу; падіння деталей зі стола - під час контроль технічного стану агрегатів, вузлів та деталей: випадання з рук мірного інструменту та пристроїв для дефектування; неправильне використання інструментів та пристроїв; - під час транспортування знятих вузлів деталей для їх заміни: падіння деталей і складальних одиниць з обладнання; перекидання обладнання разом з транспортованими вузлами; наїзд мобільним обладнанням на виконавців робіт або на інших присутніх осіб; наїзд мобільним обладнанням на інше обладнання, трактори або їх складові частини;

Небезпечні умови операції (НУ) [48-52]: використання шкідливих для здоров'я мийних розчинів (НУ1): використання легкозаймистих речовин (НУ2): несправні інструменти (НУ3): несправне обладнання (НУ4): порушення вимог безпеки праці (НУ5): Небезпечні дії (НД): розбризкування мийного розчину, витікання технологічних рідин (НД1): користування інструментом, що

спричинює іскроутворення, значний нагрів або відкритого полум'я, паління цигарок (НД2): та використання відкритого полум'я (НД3): потрапляння горючих матеріалів на нагріті деталі: використання несправного обладнання (НД5): Небезпечна ситуація (НС): потрапляння агресивних речовин на шкіру та в очі (НС1): займання горючих речовин (НС2): зіскакування інструментів з деталей (НС3): падіння деталей, інструментів обладнання або непередбачена траєкторія їх руху (НС4) необачні або невмілі дії виконавця (НС5) [49]

На підставі співставлення небезпечних умов операцій (НУ), небезпечних дій (НД), та небезпечних ситуацій (НС) складаємо модель процесу.

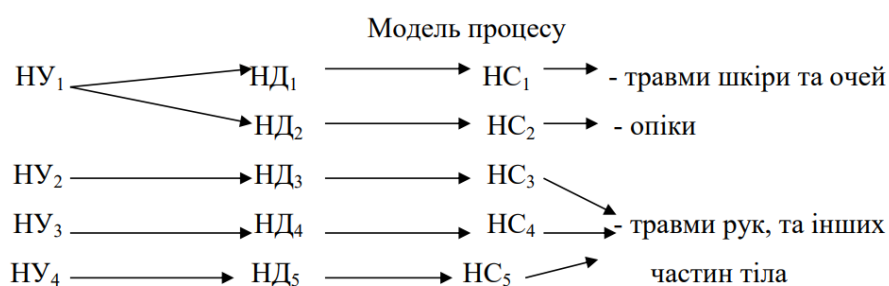


Рис. 4.1 Модель наслідків небезпек

Висновки по розділу

Удосконалення умов та безпеки праці під час операцій ТОР у ремонтних підрозділах передбачає деталізацію відповідних завдань та функцій відділу безпеки праці для запровадження у виробничих підрозділах організаційних схем, конкретизування обов'язків та прав керівників та виконавців. Під час операцій ТОР періодично мають місце шкідливі чинники виробництва – позанормативні параметри мікроклімату (температура, швидкість руху повітря, освітлення, світлове і теплове випромінювання), запиленість, шум, вібрація, токсичні гази двигунів внутрішнього згоряння тощо. На основі аналізу виникнення аварій і травм розроблено графічні схеми небезпечних ситуацій (під час слюсарних робіт, підйомно-транспортних операцій та ін.), які спрощують оцінку безпечності і дають змогу розробляти заходи запобігання, загалом покращують стан безпеки праці у підрозділах. [48].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В представленому дипломному проекті приведений удосконалений технологічний процес відновлення поршневих пальців тракторних дизельних двигунів методом термопластичного роздавання, який дозволяє, без зниження якості відновлених поршневих пальців та їх післяремонтного ресурсу, підвищити продуктивність технологічного процесу відновлення. Економічний розрахунок показав доцільність використання удосконаленого технологічного процесу, при виконанні річної програми ремонтів в 400000 штук, при цьому забезпечується річна економія, порівняно з базовим технологічним процесом на суму 186657,31 гривень. Тому є доцільним впровадження нового пристосування в виробництво.

Розроблені заходи по створенню безпечних та нешкідливих умов праці робітників на ділянці відновлення поршневих пальців, аналіз стану споруд інженерного захисту на випадок виникнення небезпечних ситуацій, дозволяють забезпечити проведення відновлювальних робіт у відповідності з вимогами

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лауш П.В., Василенко І.Ф., Лесюк Т.П. та ін. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник в 2-х ч. За редакцією П.В.Лауша та І.Ф.Василенка. Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс, 2007.
2. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. К.Знання-Пресс, 2003. 511с.
- 3.Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. №3. С. 109-119.
4. Черновол М.І., Булей І.А., Кропівний В.М., Технологічні планування підприємств і їхніх підрозділів з ремонту та технологічного обслуговування тракторів. Автомобілів і іншої сільськогосподарської техніки. Альбом: Навчальний посібник – Кіровоград: Кіровоградський державний технічний університет, 1999. 175с.
- 5.Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 648 с.
6. Indiastat. Agricultural Statistics at a Glance; c2021-22. Available from: <http://www.indiastat.com>
7. Мазурок О. І. Проект дільниці ремонтного цеху для відновлення поршневих пальців 60-03105.30, з дослідженням процесу термопластичної роздачі поршневих пальців дизельних двигунів: кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „274 – Автомобільний транспорт“. Тернопіль: ТНТУ, 2021. - 77 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36894>
8. Дембіцький Н. В. Відновлення та поверхневе зміцнення сталей деталей сільськогосподарських машин : кваліфікаційна робота : спец. 208 «Агроінженерія» / Поліський нац. ун-т, каф. машиновикористання та сервісу технологічних систем ; наук. кер. Куликівський В. Л. – Житомир, 2021. – 34 с. <http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/12587>
9. Відновлення поршневих пальців гарячим пластичним деформуванням / Ю. В. Кулешков, М. В. Красота, Т. В. Руденко та ін. // Центральноукраїнський

- науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – Вип. 4 (35). – С. 54–62. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).54-62](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).54-62) <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11377>
10. Неділько, В. В. (2017). Аналіз способів відновлення поршневих пальців. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/35698/1/tezy_molod_i_sg_2017-121.pdf
 11. Бобоюдо Л. М. Восстановление поршневых пальцев. Техника в сельском хозяйстве. 1976. №1. С. 89–90.
 12. Капелюшний Ф. М., Аулін В. В., Солових Є. К., Лізунов С. М. Обґрунтування доцільності вибору ЕКН ПП при їх ГТПР. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград. 2002. Вип 11. С. 185–192.
 13. Карабиньош Сергей. Неразрушающие испытания деталей сельскохозяйственных машин как основа обеспечения их высокого качества. Motrol. Motoryzacia i Energetyka Rolnictwa Motorization and Power Industry in Agriculture. 2015. Vol. 17. № 3. P. 191–196.
 14. Ружило З. В., Новицький А. В. Огляд теоретичних досліджень надійного функціонування систем «ЛМС» під впливом технічного обслуговування і ремонту. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Харків. 2016. Вип. 2. С. 223–231.
 15. Засулько, А. А. (2018). Характерні відмови поршневих пальців. *Збірник тез доповідей XIV Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2018»(19-22 травня 2018 року)/Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2018. С. 59-61.* https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_tez_2018_techenergy.pdf#page=59
 16. Скобло Т. С., Власовец В. М., Науменко А. О., Дудников И. А. Исследование влияния виброобработки на упрочнение структурных составляющих стали 10. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. Вип. 158. С. 279–287

17. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., Щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М. О. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. Вісник ПДАА. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk2020.04.36
18. Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies/Anatolii Dudnikov, Olena Ivankova, Oleksandr Gorbenko, Anton Kelemesh// Eastern-European journal of enterprisetechnologies. 2/1 (110) 2021 С. 104-108. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606
19. Дудніков А.А., Дудник В.В., Біловод О.І., Іванкова О.В., Лапенко Т.Г. Зміцнення матеріалу деталей пластичним деформуванням. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки». Луцьк. 2019. Випуск 66. С.95-97.
21. Шваб'юк В.І. Опір матеріалів: навчальний посібник. К.: Знання, 2009. 380с.
20. Посвятенко Е.К., Будяк Р.В., Мельник О.В. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів : підручник. К. НТУ, 2019. 184 с.
22. Іванкова О.В. Патент на корисну модель № 59687. «Спосіб відновлення та зміцнення сталених втулок». 25.05.2011. Бюл. 310. МПК 2011.01 С21Д 1/06 (2006.01) В23Р6/00.
23. Іванкова, О., Общій, Я., Кисіль, Ю., & Федін, В. (2024). Determination of residual internal stresses of cylindrical details in the process of their distribution. *SWorldJournal*, 1(25-01), 55–62. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-25-00-063>
24. Іванкова, О., В. Бартош, Я. Общій, Ю. Кисіль. «Відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки пластичним деформуванням». *Modern Engineering and Innovative Technologies*, вип. 1, вип. 25-01, Лютий 2023, с. 23-29, doi:10.30890/2567-5273.2023-25-01-073 . <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-25-01-073>
25. Дудников А.А., Іванкова О.В., Бурлака О.А., Канівець О.В., Дудник В.В. Роль поверхневого деформування деталей у підвищенні їх ресурсу. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та

- металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»).
2021. № 71. С. 191-195
26. Дудніков, А.А., Дудник, В.В., Бурлака, О.А., Канівець, О.В., & Кривонос, С.М. (2020). Відновлення деталей поверхневим пластичним деформуванням. *Scientific Progress & Innovations*, (4), 251-258.
 27. Посвятенко Е.К. Протягування та протяжний інструмент: монографія / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, І.В. Шепеленко. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. – 298 с.
 28. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Storchak M. Plasticity Resource of Cast Iron at Deforming Broaching. *Metals* 2023, 13(3), 551. <https://doi.org/10.3390/met13030551>.
 29. Посвятенко Е.К. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: монографія/ Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Е. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.
 30. Sheykin, S.Y.; Rostotskiy, I.Y.; Protsyshyn, V.T.; Melnichenko, V.V.; Studenets, S.F.; Efrosinin, D.V. Improving the Performance of Hard-Alloy Deforming Broaches Using Modified Technological Lubricants. *J. Superhard Mater.* 2020, 42, 276–282. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 31. Sheykin, S.Y.; Grushko, O.V.; Melnichenko, V.V.; Studenets, S.F.; Rostotskiy, I.Y.; Iefrosinin, D.V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. *J. Superhard Mater.* 2021, 43, 222–230. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 32. Grzesik, W. Development in broaching technology. Part I. Development of broaching machines and tooling devices. *Mechanik* 2021, 5, 6–11. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 33. González, G.; Plogmeyer, M.; Zanger, F.; Biehl, S.; Bräuer, G.; Schulze, V. Effect of tool coatings on surface grain refinement in orthogonal cutting of 4140 steel. *Procedia CIRP* 2020, 87, 176–180. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

34. Bai, J.; Tong, Z. A novel multiscale material plasticity simulation model for high-performance cutting AISI 4140 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, *116*, 3891–3904. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Çırak, O.; Altan, E. Development of a Software for Designing In-Hole Broaching Tools. *J. Adv. Manuf. Eng.* 2020, *1*, 101–121. Available online: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jame/issue/65471/1012079> (accessed on 25 January 2023).
36. Dou, W.; Xu, Z.; Hu, H.; Huang, H. A generalized plasticity model incorporating stress state, strain rate and temperature effects. *Int. J. Impact Eng.* 2021, *155*, 103897. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
37. Sarkar, S.; Singh, I.V.; Mishra, B.K. A localizing gradient plasticity model for ductile fracture. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2022, *388*, 114205. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Natkowski, E.; Sonnweber-Ribic, P.; Münstermann, S. Surface roughness influence in micromechanical fatigue lifetime prediction with crystal plasticity models for steel. *Int. J. Fatigue* 2022, *23*, 106792. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Stashkov, A.N.; Schapova, E.A.; Afanasiev, S.V.; Stashkova, L.A.; Nichipuruk, A.P. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters. *J. Magn. Magn. Mater.* 2022, *546*, 168850. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Shepelenko, I.; Tsekhanov, Y.; Nemyrovskiy, Y.; Gutsul, V.; Mahopets, S. Compression Mechanics of Cylindrical Samples with Radial Deformation Limitation. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*; Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE-2021; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 53–62. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Ammar, M.M.A.; Shirinzadeh, B.; Elgamal, H.; Nasr, M.N.A. On the Role of Damage Evolution in Finite Element Modeling of the Cutting Process and Sensing Residual Stresses. *Sensors* 2022, *22*, 8547. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Yoon, S.-Y.; Barlat, F.; Lee, S.-Y.; Kim, J.-H.; Wi, M.-S.; Kim, D.-J. Finite element implementation of hydrostatic pressure-sensitive plasticity and its

- application to distortional hardening model and sheet metal forming simulations. *J. Mater. Process. Technol.* 2022, 302, 117494. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. Дзюра, В. О., Марущак, П. О., Радик, Д. Л., & Сокіл, М. Б. Динаміка відносних крутильних коливань при формуванні регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/cab9845e-815c-419a-a7de-36c52da79a03/content>
44. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Chernovol, M., & Zlatopolskiy, P. (2022). Development of a technological process for the restoration of piston pins using deforming broaching. *Problems of Tribology*, 27(3/105), 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-41-48>
45. Гранкін С.Г. та ін. Надійність сільськогосподарської техніки.-К. Урожай, 1998.-208с.
46. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія та обладнання для відновлення автомобільних деталей» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 274 „Автомобільний транспорт” / Укл. Авер'янов В.С., Кам'янське: ДДТУ, 2018. – 70 с.
47. Дробот О. С., Підгайчук С. Я., Яворська Н. М., Нестер А. А, Багрій О. В. Використання термоциклічного оброблення для підвищення втомної міцності цементованих деталей // *Металофізика та новітні технології=Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. Т. 45, вип. 5. С. 647-661. <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/15015>
48. Смик Н.О. Проект покращення умов праці під час технічного обслуговування і ремонту автомобілів з розробкою конструкції знімача : кваліфікаційна робота. Львів, 2024. 48 ст.
49. Практикум з ремонту машин. Технологія ремонту машин, обладнання та їх складових частин. Том 2 / О.І. Сідашенко, та інші/ За ред. О.І.Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 491с.
50. Катренко Л.А. Кіт Ю.В., Пістун І.П. Охорона праці. Курс лекцій, практикум: науч. посіб. Суми: Університетська книга, 2009. 240 с.

51. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зачарний В.В. та ін. Основи охорони праці: Підручник. Київ: Основа, 2003. 472 с.
52. Запорожець О.І., Протоєрейський О.С., Франчук Г.М., Боровик І.М. Основи охорони праці. Підручник. Київ: центр учбової літератури. 2009. 264 с.

ДОДАТКИ