

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Дослідження основних параметрів
гідродробоструминного зміцнення деталей машин»

КРМ.133ГМмд_22.23.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«*Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва*»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_22
ТИТАРЕНКО Олександр

Керівник: канд. техн. наук, доцент
МУРАВЛЬОВ Володимир

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Якісна характеристика сучасної продукції машинобудування повинна оцінюватися працездатністю та довговічністю при низькій собівартості виробу і малій витраті металу. Критеріями оцінки якості відповідальних деталей є шорсткість поверхні, точність виконуваних розмірів, а також, по відношенню до безвідходних технологічних методів в машинобудуванні, фізико-хімічні властивості поверхневих шарів: наклеп (глибина, ступінь), рельєф мікрогеометрії (надріз від інструменту, радіус западини – виступу), залишкові напруження (величина, знак, характер розподілу), які мають переважаючі значення в забезпеченні надійності, а також працездатності конструкції в більшості випадків.

Збільшення агрегатної і циліндрової потужностей форсованих дизелів призводить до збільшення розмірів циліндрових втулок. Необхідно проводити перевірку надійності циліндрових втулок за критерієм «втомна міцність», тому що більшість руйнувань (на підставі практики ремонту і літературних даних) викликано втомним руйнуванням на характерних ділянках з наявністю концентраторів напруження.

Подальше форсування дизелів вимагає проведення спеціальних досліджень щодо підвищення втомної міцності циліндрових втулок методами поверхневого пластичного деформування (ППД).

Зміцнення поверхневим пластичним деформуванням є однією з головних проблем в ресурсозберігаючому технологічному процесі виробництва сучасних деталей машин. Таке велике значення проблеми ППД пояснюється наступними основними особливостями:

- поверхневий шар циліндрової втулки в умовах експлуатації має мале протистояння втомі через виникнення і розвиток втомних тріщин, корозії, природної схильності до виникнення концентрації напружень, зносу і інших чинників;
- максимальні динамічні напруження виникають в поверхневому шарі від згину та кручення, які є головними видами навантаження на деталі.

Отже, спеціальні дослідження по підвищенню втомної міцності повинні бути спрямовані на оптимальне зміцнення конструкції циліндрової втулки і зведення до мінімуму шкідливого впливу зазначених особливостей, а також розробку спеціальної технологічної підготовки методами поверхневого пластичного деформування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Процеси поверхневого пластичного деформування

При виготовленні та експлуатації деталей машин на їх поверхнях утворюються нерівності та мікронерівності, а шар металу, безпосередньо прилеглий до поверхні, змінює структуру, фазовий і хімічний склад, в ньому виникають залишкові напруження.

В умовах експлуатації поверхневий шар різних деталей піддається найбільш сильному фізико-хімічному впливу: механічному, тепловому, магнітоелектричному, світловому, хімічному та ін. У більшості випадків у деталей починають погіршуватися службові властивості поверхні: знос, ерозія, кавітація, корозія, втомні тріщини та інші руйнування, що розвиваються на поверхні. Тому до поверхневого шару пред'являються зазвичай вищі вимоги, ніж до основної маси деталі.

Слід зазначити, що фізико-механічні властивості поверхневого шару деталей змінюються при виготовленні, а потім – під час експлуатації під впливом силових, температурних та інших факторів [1].

Під дією циклічних навантажень спостерігається втрата працездатності деталей, причиною якої є втома матеріалу. Багаторічний досвід експлуатації різних конструкцій переконує в тому, що якість поверхні і геометрична форма є одним із головних чинників, що визначають міцність від втоми деталей. Наявність на поверхні деталі, що працює в умовах циклічного навантаження, окремих дефектів, шорсткості, різких конструктивних елементів, сприяють концентрації напружень, величина яких може перевищити межа втоми металу.

Зміцнюючі методи поверхнево-пластичного деформування (ППД) поверхневого шару сильно впливають на втомну міцність деталей, за даними

дослідження [2], [3], наклеп розтягуванням або стиск підвищує втомну міцність деталей машин до 40% в залежності від виду пластичної деформації.

Вивченню процесів поверхнево-пластичного деформування (ППД) деталей присвячені роботи І.В. Кудрявцева [4], М.А. Балтера [5], А.М. Овсієнко [6], Ж.А. Мрочека і Л.М. Кожуро [7], Б.А. Кравченко [8], В.М. Смелянського [9] та ін. Їх дослідженнями доведено, що експлуатаційні властивості деталей машин досягаються зміцненням поверхневого шару за допомогою ППД і утворенням до початку експлуатації сприятливих початкових технологічних залишкових напружень.

З точки зору енергетичних можливостей і якісних змін стану деформованого матеріалу актуально застосування динамічних методів пластичного деформування: дробоструминний, віброударний, віброконтактний, гідродробоструминний, пневмодинамічний, ротаційний, ударне карбування, ультразвуковий наклеп, гідрогалтовка дробом і ін.

Одним з найбільш важливих результатів обробки ППД є виникнення у металі залишкових напружень стиску [10]. Причина виникнення залишкових напружень стиску полягає в тому, що поверхневі шари металу збільшуються в об'ємі при пластичній деформації, а нижні шари перешкоджають цьому. Під впливом залишкових напружень стиску опиняються верхні шари, а під впливом залишкових напружень розтягу – нижні шари.

При обробці ППД поліпшуються фізико-механічні властивості поверхневого шару і змінюється мікрорельєф поверхні в результаті підвищення межі текучості, твердості і опору відриву.

При ППД досягається ефект зміцнення деталей проявляється по різному і призводить до значного збільшення довговічності і підвищення межі витривалості в корозійно-активних середовищах за рахунок зміни мікрорельєфу поверхневого шару і механічних властивостей [11].

Обробці ППД можуть піддаватися не тільки всі поверхні деталі, але і окремо ділянки концентраторів напружень (отвори, галтелі, пази) [12, 13].

Однак технологічні процеси ППД і механічної обробки поряд з вищесказаними перевагами створюють залишкові напруження у вигляді неоднорідного силового поля, які викликають втомні тріщини і короблення. Формування неоднорідного силового поля технологічних залишкових напружень простежити послідовно дуже складно, так як задача не має ні теоретичного, ні експериментального рішення. Наявні нечисленні теоретичні розробки базуються на визначенні початкових технологічних залишкових напружень в режимі «насичення», який практично не змінює картину напружено-деформованого стану поверхневого шару.

Початкові технологічні залишкові напруження залежать від робітників і монтажних напружень конструкції, які повинні враховуватися при диференційованому ППД поверхневого шару [14].

1.2 Деталі машин, що потребують зміцнення

Основною і головною задачею технології машинобудування є виготовлення деталей заданої якості у встановлені терміни і забезпечення їх експлуатаційної надійності при мінімальних затратах праці і ресурсів. Для цього рішення ефективним напрямком є технологічне забезпечення оптимальних для заданих умов експлуатації параметрів стану поверхневого шару, а також точності виготовлення деталей і складання машин [14].

У сучасних дизелях настільки зросло значення динамічних навантажень, що кожне подальше форсування за критеріями частоти обертання і термодинамічного циклу колінчастого вала потребують виконання комплексу робіт, пов'язаних зі збільшенням експлуатаційної надійності циліндрових втулок [15]. Наприклад, при форсуванні дизеля з підвищенням максимального тиску циклу буде виникати збільшення напруження знакозмінного згину, збільшення тиску газу і коливальних процесів в циліндрових втулках. Оцінка величини динамічних напружень і навантажувальних сил дозволяє визначити доцільність і можливість прийнятого

ступеня форсування і дати загальне уявлення щодо прогнозованої працездатності цих дизелів [16].

Чотиритактний високооборотний дизель 6ЧН21/21 з різноманітним рівнем форсування за критеріями частоти обертання і термодинамічного циклу колінчастого вала (рисунок 1.1), широко використовується із силовим агрегатом СА-10 (потужність $N_e = 464$ кВт) [17].

Рисунок 1.1 – Дизель 6ЧН21/21

Як об'єкт дослідження розглядалися циліндрові втулки високофорсованого дизеля 6ЧН21/21. Циліндрові втулки встановлюються у відсіках блок-картера в кількості 6 шт. на дизель. Конструкція циліндричної втулки представляє собою тіло обертання, що складається з ущільнювального фланця і оболонки із невеликими перепадами діаметрів від 1,5 до 3 мм по зовнішній поверхні (рисунок 1.2). У нижній частині конструкції є проточки під установку гумових ущільнювачів. По внутрішній поверхні $\varnothing 210H7 (+0,046)$ відбувається переміщення поршня під час роботи. Циліндрова втулка встановлюється в блок зовнішнім пояском $\varnothing 239,97_{-0,04}$ до упору у фланець.

На зовнішній поверхні є дві ділянки заниження $\varnothing 237 \pm 0,5$, в цих зонах відбувається охолодження циліндрової втулки під час роботи. Галтель переходу

від заниження до фланця виконана радіусом $R2^{+0,2}$ мм, решта – R10 мм (рисунок 1.3).

Рисунок 1.2 – Циліндрові втулки дизеля 6ЧН21/21

Циліндрова втулка виготовляється з легованого чавуну марки АХНММ за ТУ 24.06.06.043-90 за наступним хімічним складом:

- вуглець (C) - 2,9 ... 3,3%;
- марганець (Mn) - 0,85 ... 1,25;
- кремній (Si) - 1,5 ... 2,0;
- фосфор (P) - 0,1;
- сірка (S) - 0,1;
- хром (Cr) - 0,4 ... 0,6;
- нікель (Ni) - 1,1 ... 1,5;
- молібден (Mo) - 0,4 ... 0,6;
- мідь (Cu) - 0,25 ... 0,45.

Даний легований чавун володіє зносостійкістю, що дозволяє працювати в умовах ударного абразивного зношування, невеликою корозійною стійкістю через включення до складу хрому, нікелю і міді, молібден додає жаростійкість. Чавун

володіє наступними характеристиками міцності: тимчасовий опір при розтягуванні $\sigma_B = 350$ МПа, твердість 217 - 285 НВ.

Крім перерахованих властивостей, даний легований чавун володіє хорошою пластичністю через низький вміст фосфору, а також балансу пропорцій легуючих елементів – кремнію, нікелю та міді, що дозволяє використовувати для даного матеріалу зміцнювальну дробоструминну технологію [18].

Рисунок 1.3 – Конструкція циліндричної втулки комбінованого високофорсованого дизеля

У конструкторській документації вказані показники якості: ресурс втулки повинен забезпечуватися на весь період експлуатації дизеля (20000-25000 годин) і рівень залишкових напружень на поверхнях циліндричної втулки не повинен перевищувати 30 ... 50 МПа.

Верхнім ущільнюючим фланцем втулка притискається кришкою циліндра до блоку через мідну прокладку ущільнення газового стику. Нижній пояс втулки циліндра (від просочування охолоджуючої рідини в піддон дизеля) ущільнений круглими гумовими кільцями, які встановлюються в канавки на циліндровій втулці. Циліндрова втулка охолоджується через отвори в блоці-картері, які виконані навпроти кожного циліндра, рідиною, що надходить з центрального водяного каналу.

Високі вимоги пред'являються до внутрішньої поверхні циліндричної втулки: забезпечення малого відхилення поверхні отвору від ідеальної геометричної форми циліндра, що досягається фінішною операцією – хонінгуванням дзеркала циліндра грубозернистими алмазними брусками. Цією ж операцією компенсується залишкова деформація втулки шляхом зняття припуску в процесі хонінгування. У даній роботі не розглядається технологія зміцнення внутрішньої поверхні, інтерес представляє зовнішня поверхня, з наявністю перепадів діаметрів, концентраторів напружень і процесів, що виникають при роботі циліндрової втулки.

1.3 Методи удосконалення втомної міцності

У даному аналізі розглядаються найбільш пізні роботи щодо застосування безвідходних технологічних методів підвищення працездатності зовнішньої поверхні циліндрових втулок високо форсованих дизелів. Зносостійкість, зміцнення внутрішньої поверхні, питання технології гідродинаміки змащувального шару між втулкою і поршнем, що мають самостійні значення не аналізуються і не розглядаються.

Підвищення працездатності циліндрових втулок пов'язано з розробкою технологічних заходів, спрямованих на релаксацію залишкових напружень в

процесі їх виготовлення [19]. Цього можна досягти удосконалення технологічного процесу термообробки втулок [20], виключення операції розгортання внутрішньої поверхні втулки після відпускання, введення операції природного старіння перед хонінгуванням. Замість розгортання доцільно застосування силового хонінгування крупнозернистими брусками.

У поверхневому шарі навантажених циліндрових втулок виникають пружні та пластичні деформації. Пластичні деформації можливо усунути зменшення діючих динамічних навантажень або підвищенням опору стійкості металу пластичному деформуванню, тобто підвищити його релаксаційну стійкість. Для цієї мети, поряд із використанням поширених технологічних процесів (штучне старіння [21], низькотемпературне відпалювання для зняття внутрішніх напружень [22]), знаходить широке застосування вібраційне старіння [23]. У багатьох випадках воно замінює термічну обробку високої вартості, яка вимагає складного обладнання, скорочує час старіння.

Як показали випробування зразків з циліндрових втулок [24] нікель-фосфатне покриття зовнішньої поверхні втулки підвищує корозійно-втомну міцність тільки при умові попереднього якісного ущільнення наклепом. Без останнього корозійно-втомну міцність різко знижується.

Питанням вивчення кавітаційних процесів у зовнішніх поверхнях циліндрових втулок присвячена робота [25]. Причиною зниження працездатності втулок внаслідок кавітаційних руйнувань є вібрація стінок порожнин охолодження дизелів [26], що впливає на місцеве підвищення тиску та температури. Зменшення вібрації, що приводять до кавітаційного руйнування, досягають конструктивними заходами: оптимальним вибором товщини стінки циліндрових втулок, зазорів між поршнем і втулкою, величиною міжопорної відстані та кількістю посадкових поясів [27], [28].

Для підвищення працездатності циліндрових втулок [4] при з виготовленні застосовують сухий поверхневий наклеп дробом внутрішніх і зовнішніх поверхонь. Зміцнення оцінюють за величиною залишкових напружень, для визначення яких з ущільнюючих втулок вирізають кільця товщиною 10 мм. На

поверхні кілець наклеюють тензодатчики, за зміною показників яких після розрізання кільця судять про напруження навколо отворів [29]. Крім зміцнення сухим дробоструминним наклепом, внутрішня і зовнішня поверхні втулки в поясі шириною 180 мм піддаються накочуванню для забезпечення заданої величини натягу при посадці в блок-картер.

Від'ємним фактором сухої дробоструминної обробки є недостатньо висока втомна міцність різних перетинів деталі після зміцнення [30], зумовлена неповним використанням матеріалу конструкції внаслідок неоптимального розподілу залишкових напружень в поверхневому шарі на його різних ділянках. В результаті перепаду напружень стиску і розтягу підвищується нерівномірність навантаження суміжних об'ємів металу і відбувається втрата рівномірності різних ділянок поверхні циліндрової втулки, тобто знижується втомна міцність матеріалу. При сухій дробоструминній обробці швидко зношуються деталі дробоструминної установки, виділяється значна кількість металевого пилю.

Внаслідок складної конфігурації зовнішньої поверхні циліндрової втулки та нерівномірного розподілу динамічних робочих і залишкових напружень, важко визначити величину залишкових напружень в циліндровій втулці розрахунковим шляхом. А також складно враховувати аналітично фактори, які впливають на формування напружено-деформованого стану поверхневих шарів. Створення основи розрахунку із придатною для практики точністю на сьогодні є актуальною проблемою теорії і практики поверхневого пластичного деформування циліндрових втулок високофорсованих дизелів.

Завдяки універсальності та досить високій продуктивності обробку переважно зовнішніх поверхонь різної кривизни пропонується розглянути гідродробоструминну обробку (ГДО). Відмінною її особливістю є використання струменів рідини під тиском 2-3 МПа в якості енергоносія. При цьому зменшується показник шорсткості на один-два параметри, при глибині ущільненого шару до 0,2-0,3 мм мікротвердість збільшується на 30%, остаточні напруження стиску утворюються в поверхневому шарі до 1200 МПа. У порівнянні із сухою дробоструминною обробкою, при ГДО забезпечується більш досконала

обробка поверхні і внаслідок цього застосовується переважно для кінцевої обробки [12].

Забезпечення нормального функціонування деталей при експлуатації можливо при рівномірному розподілі сумарних величин робочих напружень в їх поверхневому шарі. Цього можна досягти із застосуванням ГДО з локальним впливом на різні ділянки, на підставі картини напружено-деформованого стану оброблюваної деталі. Дані питання знайшли відображення в роботах, присвячених дослідженню колінчастих валів, шатунних підшипників, шатунів, але їх дослідження не підходять для тонкостінних циліндрових втулок, які працюють в іншій системі навантаження і впливу температури.

Проведений аналіз публікацій щодо застосування технологічних методів підвищення працездатності циліндрових втулок вказує на істотність впливу зміцнення зовнішніх поверхонь втулок як одного з факторів підвищення працездатності високофорсованих дизелів. Слід зазначити також, що кількість інформації у літературі з технологічних методів підвищення працездатності циліндрових втулок дуже обмежена, на відміну від інших деталей.

1.4 Фактори втрати працездатності деталей машин

При збільшенні енергонасиченості машин і їх вартості виникає необхідність пошуку різних ресурсів для забезпечення експлуатаційної надійності складальних одиниць і відповідальних деталей дизелів. При цьому машини повинні володіти конкурентоспроможністю, що вимагає створення високих переваг в дизелях в порівнянні з наявними найкращими аналогами, загальновизнаними на міжнародному ринку.

Забезпечення високої експлуатаційної надійності не завжди можливо і не можна однозначно задати оптимальні розміри і форму відповідальних деталей [31]. Це пов'язано з певними труднощами:

- широке розмаїття напружено-деформованих станів і умов, що виникають в реальності при навантаженні деталей;

- наявність взаємозв'язків, при яких високонавантажені елементи можуть вивести їх з ладу інші елементи, спричиняючи на них побічні дії.

Технічний стан елементів (таблиця 1.1) набуває закономірність зміни в процесі експлуатації дизелів та іншого обладнання [4], [31], [32].

За таблицею 1.1 видно, що більша частина закономірних відмов обумовлена втомним руйнуванням і зношуванням, незважаючи на різні підходи до причин відмов.

Таблиця 1.1 – Фактори відмови дизелів, %

Фактори	Початкові дані [4, 31, 32]		
Зношування	40	50	41,4
Пластична деформація	26	35	17,5
Втомне руйнування	18	35	15,5
Теплове руйнування	12	-	14,1
Корозія	-	15	0,3
Інше	4	15	3,2

Якщо при розгляді виходів з ладу дизелів виключити грубі помилки проектування і експлуатації, а також різкі розрахункові перевантаження або несприятливі поєднання цих факторів, то всі інші випадки, при яких наступають граничні стани, можна віднести до однієї групи з двох. До першої типової групи несучих елементів, що працюють в умовах високої навантаженості, відносяться граничні стани, які утворюються внаслідок накопичення розсіяних пошкоджень в матеріалі, що призводять до виникнення і розвитку втомних тріщин до небажаних і небезпечних розмірів. Якщо своєчасно не виявлена тріщина, то її розвиток призводить до аварійної ситуації [33].

До другої групи належать граничні випадки, пов'язані з підвищеним зносом тертьових поверхонь і деталей.

Характер відмов у високонавантаженій деталі в більшості випадків пов'язаний із виникненням втомних тріщин [34], близько 92,5% по представленим даним, які спостерігаються в процесі експлуатації транспортних дизелів (таблиця 1.2).

Для циліндрових втулок спостерігається утворення таких дефектів, як: тріщини, забоїни, корозія, риски, напрацювання, задирки, збільшення діаметра, роз'їдання, конусоподібність і овальність робочої поверхні, а також ослаблення в місцях посадки [35].

Деякі дефекти циліндрових втулок визначаються без демонтажу втулки з блоку циліндрів. Залежно від виду, дефекти можуть призводити до порушення рівномірності охолодження циліндрової втулки, з наслідками аварійної відмови дизеля (вихід з ладу рамних підшипників, їх перегрів, задирки у вузлі втулка-поршень т.д.). У таблиці 1.3 зазначимо виникаючі при експлуатації характерні дефекти циліндрових втулок [36].

Таблиця 1.2 – Характерні відмови у форсованих дизелях

Відмова	Число відмов	Відсоток, %
Дефекти виготовлення	7	2,6
Помилки експлуатації	4	1,5
Тріщини	247	92,5
Корозія	2	0,7
Повзучість	4	1,5
Невстановлені	3	1,1
Усього	267	100

Таблиця 1.3 – Характерні дефекти циліндрових втулок

Дефект	Причина
1	2
Зношування робочих поверхонь втулок (рисунок 1.4)	Це пов'язано з температурним режимом і тиском газів, погіршенням змащення при роботі двигуна при високих температурах. При погіршенні змащення між циліндровою втулкою і поршнем можлива поява сухого тертя поршневих кілець з циліндровою втулкою, що спричинить за собою

	знос кілець і втулки.
Виникнення тріщин по поверхні втулки і в опорному бурті (рисунок 1.5)	Причиною виникнення є неспіввісність осей ущільнювальної канавки і опорного паска циліндрової втулки. При перекладанні поршня [37] під дією нормальної сили з'являються тріщини, пов'язані із «розгойдуванням» циліндрових втулок в блоці циліндрів при жорсткому закріпленні бурта,

Продовження таблиці 1.3

1	2
	що призводить до появи тріщин в самому буртові через збільшення напружень. Причиною утворення тріщин у втулці стають високі температурні напруження з подальшим виходом її з ладу. Дефект виникає при високому температурному перепаді між поверхнями боку охолоджуючої рідини і сторони дії газів. Різка зміна температурних напружень спостерігається при пусках і зупинках двигуна.
Задири на робочих поверхнях втулок (рисунок 1.6)	Задири виникають через порушення охолодження поршня, поганого змащення, нагароутворення, попадання нагару на поверхню. Маленький зазор осьових зсувів кілець і в замкові поршневі кілець.
Корозійно-кавітаційне руйнування (рисунок 1.7)	Даний дефект виникає на поверхні з боку охолодження циліндрової втулки при порушенні технології виготовлення; низької якості матеріалів. Причинами можуть служити вібрації при роботі двигуна; погана підготовка охолоджуючої води (жорсткість вище норми і вміст солі).

Рисунок 1.5 – Тріщини: а – в опорному буртові;
б – відривання бурта внаслідок дії моментів згину

Рисунок 1.6 – Задир на робочих поверхнях

Рисунок 1.7 – Корозійно-кавітаційне руйнування

Висновки до розділу 1

1. За результатами аналізу робіт вітчизняних авторів виявлено, що відсутня технологія вирівнювання напружень в поверхневому шарі. Застосування методів поверхневого пластичного деформування знижує напруження по всій оброблюваній поверхні, але не вирівнює їх в залежності від складного профілю і робочих навантажень.

2. Здійснено вибір об'єкту дослідження (циліндрові втулки високофорсованого дизеля 6ЧН21/21).

3. Розглянуто методи підвищення втомної міцності циліндрових втулок, фактори втрати їх працездатності. Спостерігається утворення таких дефектів як тріщини, забоїни, корозія, риски, напращування, задирки, збільшення діаметра, роз'їдання, конусоподібність і овальність робочої поверхні, а також ослаблення в місцях посадки.

4. Підвищення експлуатаційної надійності циліндрових втулок можливо при забезпеченні рівномірного розподілу напружень в поверхневому шарі за рахунок розробки технології гідродробоструминного зміцнення, яке дозволяє задавати початкові залишкові напруження стиску в окремих ділянках циліндрової втулки, що забезпечить вирівнювання напружень під час експлуатації та підвищить циклічну міцність.

Отже, **мета дослідження** – підвищення експлуатаційної надійності циліндрових втулок. **Об'єктом розробки** є технологічний процес гідродробоструминного зміцнення деталей машин, а **предметом** – вплив основних технологічних параметрів на якість обробки.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- здійснити оцінку віброударного навантаження циліндрової втулки під час гідродробоструминної обробки. Визначити експлуатаційну надійність циліндрової втулки після гідродробоструминної обробки;

- розробити методику проведення експериментальних досліджень;

- експериментально визначити величину залишкових напружень, дослідити мікроструктуру поверхневого шару циліндрової втулки, а також провести багатофакторний експеримент для отримання математичної моделі.
- приділити увагу питанням практичної реалізації розробки.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Навантаження під час обробки

Зовнішній поверхневий шар втулки є особливо відповідальним, так як втомна тріщина в поверхневому шарі, в більшості випадків, з'являється під дією напружень розтягу. А несуча здатність, навпаки, істотно підвищується в результаті наявності початкових технологічних залишкових напружень стиску, що одержують в поверхневому шарі при гідродробоструминному зміцненні. У якості устаткування для гідродробоструминної обробки використовується установка (ГДУ-5, ПрАТ «Строммашина», м. Хмельницький). У процесі гідродробоструминної обробки (ГДО) циліндрової втулки виникає значне динамічне навантаження, викликане наявністю гідродинамічних коливань і кінетичною енергією удару кульок, в системі змащення [38].

Контрольні пластини або зразки-свідки, які виготовляються з того ж матеріалу, що і циліндрова втулка, використовуються для оцінки фізичного і механічного стану поверхневих шарів при ГДО. Міра інтенсивності і стабільності процесу ГДО визначається за статичною стрілкою прогину пластини. На відміну від статичного, віброударне навантаження циліндрової втулки і контрольних пластин при ГДО викликає складні процеси в самому металі. Причиною цього є зміна діаграм деформування під час навантаження, переміщення атомів кристалічної ґратки в результаті енергії, що підводиться при віброударному навантаженні, різний ступінь циклічного зміцнення або втрати міцності матеріалу.

У технічній літературі відсутня інформація про облік динаміки навантаження циліндрових втулок і зразків-свідків при ГДО. Оцінити точний запас несучої здатності і довговічність роботи циліндрових втулок неможливо без урахування характеру навантаження і його впливу на початкові залишкові напруження. Щоб зв'язати показники вібраційного навантаження при ГДО з конструктивними параметрами зразка-свідка, уведемо поняття про комплексний критерій коефіцієнта динамічності навантаження K_d [39]:

$$K_{\text{д}} = \frac{y_0}{y_c}, \quad (2.1)$$

де y_0 – амплітуда динамічного прогину зразка-свідка в точці прикладання сили;

y_c – стрілка прогину зразка-свідка при статичній дії сили, в точці її прикладання.

Розглянемо схему дослідження початкових технологічних залишкових напружень і динамічного навантаження в зразку-свідку при ГДО на прикладі закріпленої смужки галтельної зони (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Схема дослідження зразка-свідка
циліндрової втулки при ГДО

На схемі представлені зразок-свідок (поз. 1), сопло установки ГДУ-5 (поз.2), підсилювач тензостанції (поз. 3), осцилограф (поз. 4), блок живлення (поз. 5), робочі тензодатчики R_1 і R_2 , а також компенсаційний тензодатчик К.

Для дослідження зміни стрілки прогину y_0 вирізається радіусний зразок-свідок перпендикулярно осі галтельної зони, що визначена товщиною b [40] і навантажується за вищенаведеною схемою. Виникаючий при це момент M_p впливає на деформацію зразка в бік зменшення стрілки прогину.

У дослідженні нехтуємо внутрішніми силовими факторами N і Q , внаслідок малого відношення товщини зразка H до радіусу R . Розглянемо лінійну статичну зміну y_c стріли прогину на підставі залежності Мора для кривого бруса

$$y_c = \sum \int \frac{M_p \cdot M_i \cdot dS}{EI} = \int_0^{\varphi/2} \frac{M_p \cdot M_i \cdot R \cdot d\psi}{EI} + \int_{\varphi}^{\varphi/2} \frac{M_p \cdot M_i \cdot R \cdot d\psi}{EI}, \quad (2.2)$$

де M_i – момент згину від дії одиничної сили P ;

E – модуль пружності;

I – момент інерції перерізу зразка;

$dS = R \cdot d\psi$ – диференційно малий елемент.

З урахуванням того, що

$$\int_0^{\varphi/2} \frac{M_p \cdot M_i \cdot R \cdot d\psi}{EI} = 0, \quad (2.3)$$

отримаємо

$$y_c = \int_{\varphi}^{\varphi/2} \frac{M_p \cdot M_i \cdot R \cdot d\psi}{EI} = \int_{\varphi/2}^{\varphi} \frac{M_p \cdot R \cdot \sin \varphi \cdot d\psi}{EI} = \frac{-M_p \cdot R^2 \left(\cos \varphi - \cos \frac{\varphi}{2} \right)}{EI} = \frac{0,2 M_p \cdot R^2}{EI}; \quad (2.4)$$

$$M_p = b \cdot h \cdot \sigma_x^0 \cdot \frac{H}{2}, \quad (2.5)$$

де b – ширина елемента;

h – ширина пластично деформованого шару, розрахована за методикою [41];

σ_x^0 – середні залишкові напруження в радіусній зоні зразка-свідка;

H – товщина елемента.

Тоді, підставивши формулу (2.5) у (2.4), знайдемо

$$y_c = \frac{0,1 \cdot b \cdot H \cdot R^2 \cdot \sigma_x^0}{EI}. \quad (2.6)$$

З огляду на віброударний характер навантаження в процесі ГДО та з урахуванням формул (2.1) і (2.6), початкові залишкові напруження зразка-свідка в радіусній зоні визначаються за формулою:

$$\sigma_{xx}^0 = \frac{E \cdot H \cdot y_0}{1,2 \cdot R^2 \cdot h}. \quad (2.7)$$

Наприклад, при вихідних даних формули (2.7), для жорстко затисненої радіусної пластини галтельної зони циліндричної втулки дизеля 6ЧН21/21, отримаємо при $h = 2,73 \cdot 10^{-4}$ м, $H = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $R = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $y_0 = 3,7 \cdot 10^{-4}$ м:

початкові залишкові напруження $\sigma_{xx}^0 = -192$ МПа;

коефіцієнт динамічності навантаження $K_d = 1,21$.

2.2 Експлуатаційна надійність після обробки

Відповідно до «Методи випробування на втому при експлуатаційних режимах навантаження», випробування проводяться при наявності і відсутності концентраторів напруження, нормальної, підвищеної та зниженої температурах, симетричних і асиметричних циклах напружень або деформацій. Метою випробувань є забезпечення необхідної надійності і довговічності деталей при їх металоємності з мінімальними матеріальними і технологічними витратами, визначення показників надійності і запасів міцності, а також розрахунок

залишкового ресурсу після певного напрацювання або при наявності втомних пошкоджень.

Гострим концентратором напруження є втомна тріщина в циліндровій втулці. Збільшується ймовірність крихкого руйнування циліндрової втулки під дією динамічних навантажень, через які накопичуються втомні пошкодження в конструкції [42]. Визначимо еквівалентний синусоїдальний режим для експлуатаційного динамічного навантаження циліндрових втулок за пошкоджувальною дією, для якого відомі властивості міцності втулки, що ґрунтуються на двох вихідних положеннях [43]:

$$\sigma_D^m \cdot N = \sigma_{-1}^m \cdot N_0 = C, \quad (2.8)$$

де σ_D – амплітуда знакозмінного динамічного навантаження;

σ_{-1} – межа витривалості матеріалу циліндрової втулки при базовому числі циклів гармонічного навантаження;

N_0 – базове число гармонічного навантаження;

m – показник ступеня рівняння кривої витривалості;

C – константа кривої витривалості.

Накопичення пошкоджень в матеріалі циліндрової втулки відбуваються за гіпотезою лінійного підсумовування

$$D = \int_0^n \frac{dN}{N}, \quad (2.9)$$

де n – число циклів симетричних напружень із амплітудою σ_D .

Виразимо величину пошкодження D циліндрової втулки на підставі формул (2.8) і (2.9) від дії динамічних напружень зі щільністю розподілу амплітуди $P(\sigma_D)$:

$$D = \frac{N}{C} \int_0^{\infty} \sigma_D^m \cdot P(\sigma_D) \cdot d\sigma_D. \quad (2.10)$$

Для нормальних процесів закон поширення амплітуд динамічних напружень σ_D оцінюється шириною енергетичного спектра ε [44].

На індикаторній діаграмі робочого процесу [14] представлена ширина спектра індикаторної діаграми Δf , яка відраховується на рівні 0,5 від максимального значення робочого процесу S_{max} (рисунок 2.2). На діаграмі вкажемо середню кругову власну частоту зміни сили тиску газів f_{ef} , що залежить від частоти обертання колінчастого вала, кута повороту колінчастого вала.

$$f_{ef} = \frac{180 \cdot \pi \cdot n}{\alpha}, \quad (2.11)$$

де n – частота обертання колінчастого вала;

α – кут повороту колінчастого вала, при якому тиск сягає максимального значення.

Рисунок 2.2 – Індикаторна діаграма робочого процесу
високофорсованого дизеля

Для визначення ефективного періоду зміни навантаження скористаємося наступною залежністю:

$$T_e = \frac{2 \cdot \pi}{f_{e\phi}}. \quad (2.12)$$

Робочий процес динамічного навантаження вважається вузькосмуговим при умові $\varepsilon \rightarrow 0 \leq 0,3-0,4$ для високофорсованих дизелів, тим самим виключена ймовірність прояви проміжних максимальних значень. В даному випадку, закон Релея [44] застосовується для розподілу амплітуд динамічних напружень в циліндровій втулці.

$$P(\sigma_D) = \frac{\sigma_D}{S_\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_D^2}{2 \cdot S_\sigma^2}\right). \quad (2.13)$$

Підставимо цю рівність в формулу (2.10) і проінтегрувавши, отримаємо

$$D = \frac{T \cdot f_{e\phi}}{C} \cdot \varphi(m+2) \cdot S_\sigma^m, \quad (2.14)$$

де T – час напрацювання, с;

S_σ – середньоквадратичне значення поточних ординат процесу динамічних напружень σ_D ;

$\varphi(m+2)$ – нормована постійна розподілу Пірсона третього роду.

З формули (2.14) отримаємо час напрацювання циліндрової втулки при умові руйнування $D = 1$ під дією випадкових динамічних напружень

$$T = \frac{C}{f_{e\phi} \cdot \varphi(m+2) \cdot S_\sigma^m} = \frac{C \cdot T_e}{2 \cdot \pi \cdot \varphi(m+2) \cdot S_\sigma^m}. \quad (2.15)$$

За наведеною методикою, при наступних даних:

$C = 1,23 \cdot 10^{21}$; $T_e = 4 \cdot 10^{-2}$ с; $m = 3,6$; $S_\sigma = 330$ МПа; $\varphi(m+2) = 64$, матеріал втулки – спеціальний легований чавун АХНММ; напрацювання $T = 104943476$ с = 29150 год., що відповідає ресурсу дизеля 6ЧН21/21 (20000-25000 год.) до капітального ремонту.

У підсумку, оцінка експлуатаційної надійності за терміном служби зведена до інженерної точності розрахунку і дозволяє прогнозувати довговічність циліндрових втулок при експлуатації.

Висновки до розділу 2

1 Проведена оцінка результатів віброударного навантаження циліндричної втулки при гідродробоструминній обробці на основі застосування зразків-свідків і урахування коефіцієнта динамічності. При оцінці початкових технологічних залишкових напружень необхідно враховувати динаміку навантаження через коефіцієнт динамічності, величина якого досягає 1,21 при ГДО циліндрових втулок.

2 Проведена оцінка експлуатаційної надійності за терміном служби. Вона зведена до інженерної точності розрахунку і дозволяє прогнозувати довговічність циліндрових втулок при експлуатації. У нашому випадку напрацювання становить 29150 год., що відповідає вимогам.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Реалізація процесу гідродробоструминного зміцнення

Гідродробоструминне зміцнення виконується на установці ГДУ-5 (рисунок 3.1) через програмування частоти обертання циліндричної втулки, швидкості поздовжнього переміщення, зміни технологічного параметра потоку кульок для обробки поверхонь циліндрової втулки за функцією часу.

Рисунок 3.1 – Установка ГДУ-5 для гідродробоструменевого зміцнення циліндрової втулки високофорсованого дизеля 6ЧН21/21

Схема гідродробоструминного зміцнення установкою ГДУ-5 показана на рисунку 3.2. Установка ГДУ-5 складається з робочої камери (на схемі не показана), осі приводу обертання поз. 2, яка має рух W і на неї встановлюється циліндрична втулка поз. 1, дробоструменевий пістолет поз. 3, який може переміщатися по осях X , Y і змінювати кут атаки ω при повороті від маніпулятора 4.

Рисунок 3.2 – Схема гідродробоструменевого зміцнення циліндрової втулки високофорсованого дизеля 6ЧН21/21

У програмі для виявлених зон встановлюється значення часу t поверхнево-деформованих ділянок циліндрової втулки за реле, як функція переміщення по x і y , а також кута атаки ω для досягнення необхідного ступеня початкових залишкових напружень. В результаті здійснюється гідродробоструменева обробка поверхні циліндрової втулки.

На дослідній партії циліндрових втулок було здійснено гідродробоструменеве зміцнення зовнішньої поверхні на режимах, що наведено у таблиці 3.1.

Показники режиму, такі, як діаметр кульки і тиск рідини, що відповідають вимогам якості поверхні і величині отриманих залишкових напружень, підбиралися в міру обробки дослідної партії втулок.

Таблиця 3.1 – Режими гідродробоструменевого зміцнення

№ з.п.	Показники режиму	Параметри
1	Діаметр кульок, мм	1,0...2,0
2	Тиск рідини, P_p , МПа	0,15...0,35
3	Час обробки, Т, с/діл.	20...110
4	Змащувально-охолоджувальне середовище	Трансформаторне масло
5	Частота обертання циліндрової втулки, n , об/с	0,15...0,32
6	Швидкість поздовжнього переміщення, S , м/с	0,0025

3.2 Вивчення мікроструктури

Для дослідження мікроструктури поверхні зразка-свідка після гідродробоструменевої обробки у роботі застосовувався цифровий мікроскоп моделі Webbers G50S (рисунок 3.3), який призначений для відтворення збільшеного зображення об'єктів на екрані монітора. Обробка результатів вимірювань проводилася через додатковий інтерфейс на персональному комп'ютері (ПК).

Мікроскоп дає пряме і об'ємне зображення розглянутих об'єктів.

Технічні характеристики:

- збільшення мікроскопа – 7х - 90х;
- ZOOM-об'єктив – 0,7х - 4,5х;
- окуляри ширококутні – WF 10х/20; WF 20х/10;
- джерело світла, що проходить – галогенні лампи 12В, 15Вт;
- джерело відбитого світла – галогенова лампа з рефлектором 12В, 15Вт;
- камера – цифрова (8 тpx);
- візуальна насадка – біноклярна або тринокулярна.

Рисунок 3.3 – Мікроскоп Webbers G50S

Переваги цифрового мікроскопа:

- можливість використання комп'ютерних методів аналізу;
- збереження проміжних і кінцевих результатів досліджень;
- можливість без додаткових трансформацій мікроскопа здійснювати спостереження як візуально, так і на екрані монітора.

Таким чином, можна переглядати і записувати відеозображення розміром 640×480 пікселів і частотою до 30 кадрів в секунду в форматах BMP і JPEG. Три режими змінних збільшень приладу з можливістю плавного налаштування 10x, 100-200x і 400-600x, перекривають весь необхідний для практичних потреб діапазон.

3.3 Визначення залишкових напружень

Вибір раціонального методу вимірювання ґрунтувався на необхідності точного і швидкого способу встановлення характеру розподілу і визначення початкових залишкових напружень в циліндровій втулці. Обраний спосіб – метод

вимірювання магнітопружності матеріалу, принцип якого ґрунтується на аналізі взаємодії контрольованої деталі та змінного магнітного поля.

Залишкові напруження в поверхневому шарі циліндрової втулки контролювалися за допомогою приладу Stresscan-500 (рисунок 3.4) неруйнівним методом і оцінювалися за величиною залишкових напружень σ_{xx}^{01} на глибині $2 \cdot 10^{-5}$ м. В основу роботи приладу покладено методи шуму Баркхаузена і рентгенівської дифракції. При проведенні вимірювання, зменшення інтенсивності шумового сигналу Баркхаузена показує наявність початкових технологічних залишкових напружень стиску, а збільшення амплітуди шумового сигналу – початкові технологічні залишкові напруження розтягу [43].

Рисунок 3.4 – Прилад Stresscan-500

3.4 Оцінка експлуатаційної надійності

Залежно від призначення об'єкта та умов його застосування, надійність є комплексною властивістю, що включає довговічність, безвідмовність, збереженість і ремонтпридатність, згідно з стандартом «Надійність в техніці». При застосуванні технологій зміцнення необхідно в комплексі враховувати такі фактори, як механічні властивості матеріалу, залишкові напруження, коефіцієнт динамічності навантаження і режими навантаження [45].

Експлуатаційна надійність за критерієм «обмежена витривалість» Стандарту «Розрахунки і випробування на міцність» оцінюється за коефіцієнтом впливу поверхневого зміцнення на межу витривалості. Даний коефіцієнт при однакових режимах навантаження являє собою відношення межі витривалості $\sigma_{-1 D_{зм}}$ зміцнених циліндрових втулок до межі витривалості $\sigma_{-1 D}$ незміцнених втулок:

$$K_V = \frac{\sigma_{-1 D_{зм}}}{\sigma_{-1 D}}. \quad (3.1)$$

Згідно з Стандартом, для дослідження параметрів дефектного шару після гідродробоструменевої обробки використовувалися зразки діаметром робочої частини $8 \cdot 10^{-3}$ м зі спеціального легованого чавуну АХНММ, з якого виготовлена циліндрова втулка.

Для отримання шару, що втратив вуглець, зразки зазнавали термообробки за такою технологічною методикою. Зразки піддавалися об'ємному гартуванню при температурі $T = 850 \dots 900^\circ\text{C}$ та часові витримки 2 години в окислювальному середовищі з подальшим охолодженням у воді. Потім проводилося високе відпускання при температурі $T = 500 \dots 600^\circ\text{C}$ з витримкою 3 години і охолодженням у воді. Товщину шару, що втратив вуглець, визначали за методом вимірювання мікротвердості на мікрошліфах з кутом 90° до поверхні. Для виявлення мікроструктури зразків застосовувалося хімічне травлення в 5% спиртовому розчині азотної кислоти. Вимірювання мікротвердості здійснювалося на приладі ПМТ-3М (рисунок 3.5) при навантаженні втискання алмазною пірамідкою $5 \cdot 10^{-2}$ Н і при збільшенні в 500 разів.

На поверхні зразків було виконано 30 замірів по глибині з кроком $5 \cdot 10^{-4}$ м, а також 10 контрольних замірів на глибину $2,5 \cdot 10^{-4}$ м. За результатами вимірів визначено, що мікротвердість шару, що втратив вуглець, завтовшки від $1 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$ м відрізняється від основного шару в меншу сторону, тобто в знеуглецьованому шарі – $H = 34,2 \dots 39,1$ МПа, а в основному – $H = 37,4 \dots 42,5$ МПа.

Рисунок 3.5 – Мікротвердомір ПМТ-3М

Дослідження опору втоми металу зразків проводилися в симетричному і асиметричному циклах навантаження. Зразки використовувалися з наявністю знеуглецьованому шару без подальшої обробки, а також з подальшим гідродробоструменевим зміцненням за раніше визначеними режимами. Незміцнені і зміцнені зразки відчували при знакозмінному вигині в одній площині. При асиметричному циклі навантаження на зразок додатково впливало статичне навантаження розтягу.

Висновки до розділу 3

- 1 Наведено принцип гідроструменевого зміцнення зовнішньої поверхні циліндрової втулки високофорсованого дизеля. Наведено режими обробки.
- 2 Дослідження мікроструктури поверхні рекомендується здійснювати за допомогою цифрового мікроскопу Webbers G50S.
- 3 Величини залишкових напружень будуть визначатись за допомогою приладу Stresscan-500 неруйнівним методом вимірюванням магнітопружності

матеріалу, принцип якого ґрунтується на аналізі взаємодії контрольованої деталі та змінного магнітного поля.

4 Запропоновано методику оцінювання експлуатаційної надійності здійснювати за коефіцієнтом впливу поверхневого зміцнення на межу витривалості.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Мікроструктура поверхневого шару після обробки

За методикою, представленою у розділі 3, проведено дослідження мікроструктури циліндрової втулки високофорсованого дизеля. На рисунку 4.1 показана мікроструктура поверхні зразка-свідка після гідродробеструменевої обробки (ГДО), збільшена у 100 разів.

Рисунок 4.1 – Мікроструктура поверхневого шару циліндрової втулки:
а – без зміцнення, б – після ГДО

Зміцнений шар коливається в межах 0,05-0,15 мм.

4.2 Визначення залишкових напружень

На початкові залишкові напруження у поверхневому шарі циліндрової втулки впливають наступні особливості ГДО.

Початкове залишкове напруження у поверхневому шарі виробу формується в залежності від діаметра зміцнюючої кульки: 1.0; 1.5; 2.0 мм (рисунок 4.2). Питома енергія удару зменшується при збільшенні діаметра кульки, збільшується глибина

проникнення, при цьому спостерігається зниження максимальних початкових залишкових напружень з 400 МПа до 200 МПа. А при зменшенні діаметра кульки знижується глибина проникнення в поверхневий шар і збільшується максимальне значення залишкових напружень стиску. Залежно від поставленого завдання для підвищення рівня залишкових напружень необхідно зменшувати діаметр кульки, а для збільшення глибини проникнення – збільшувати діаметр кульки.

Рисунок 4.2 – Графік залежності початкових залишкових напружень від діаметра кульки після ГДО: 1 – 1,0 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2,0 мм

Тиск рідини також впливає на початкові залишкові напруження і визначає швидкість польоту дробу. Енергія удару, глибина і ступінь наклепу з подальшою стабілізацією зростає при підвищенні тиску рідини в установці ГДУ-5 і супроводжується збільшенням швидкості польоту дробу і швидкості деформації. Підвищення тиску рідини понад 0,5 МПа призводить до зниження початкових

залишкових напружень. На графіку (рисунок 4.3) покажемо залежність початкових залишкових напружень після ГДО від тиску рідини.

Рисунок 4.3 – Графік залежності початкових залишкових напружень від тиску рідини після ГДО: 1 – 0,15 МПа; 2 – 0,25 МПа; 3 – 0,35 МПа

Зі збільшенням часу зміцнення збільшуються як початкові залишкові напруження, так і глибина проникнення. Але з плином часу понад 300 с, значення початкових залишкових напружень стабілізується, подальше збільшення часу призводить до перенаклепу, який знижує експлуатаційні властивості циліндрової втулки. Представимо на рисунку 4.4 графік залежності часу і початкових залишкових напружень.

Рисунок 4.4 – Графік залежності початкових залишкових напружень від часу зміцнення після ГДО: 1 – 60-120 с; 2 – 120-180 с; 3 – 180-240 с

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що на глибину проникнення початкових залишкових напружень впливає енергія удару дробом, інтенсивність деформації в часі поверхневого шару втулки, а також енергетичні можливості і продуктивність установки ГДУ-5.

4.3 Багатофакторний експеримент

Розглянемо багатофакторну систему – технологічний процес поверхнево-пластичного деформування на основі ГДО циліндрових втулок, використовуючи метод планування постановки експерименту [46], який дозволяє отримати максимум інформації при мінімумі експериментальних досліджень.

В першу чергу необхідно визначити фактори, які надають найбільш значний вплив на хід технологічного процесу. В якості параметра оптимізації вибирається величина початкових залишкових напружень. При ГДО на початкові залишкові напруження впливають такі технологічні чинники, як час зміцнення T , тиск рідини P_p в установці ГДУ-5, діаметр зміцнюючої кульки D_k .

Представимо в таблиці 4.1 рівні варіювання факторів експериментів циліндрових втулок при ГДО.

Таблиця 4.1 – Рівні варіювання факторів експериментів

Фактори	Позначення	Код	-1 (нижній)	0 (основний)	+1 (верхній)	Інтервал варіювання
Час зміцнення, с	T	X_1	20	65	110	45
Тиск рідини, МПа	P_p	X_2	0,15	0,25	0,35	0,1
Діаметр кульки, мм	D_k	X_3	1	1,5	2	0,5

Розглянемо математичну модель із наступною залежністю:

$$\sigma_{xx} = C \cdot T^k \cdot P_p^m \cdot D_k^n, \quad (4.1)$$

де σ_{xx} – показник оптимізації (початкові залишкові напруження після ГДО);

C – коефіцієнт пропорційності;

T , P_p , D_k – фактори варіювання: час зміцнення, тиск рідини та діаметр кульки;

k , m , n – показники ступеня.

Після логарифмування шукане рівняння регресії отримало вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3, \quad (4.2)$$

де y – функція відгуку, що дорівнює логарифму початкових напружень;

b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{23} , b_{13} – коефіцієнти лінійного рівняння регресії;

X_1, X_2, X_3 – логарифми факторів варіювання:

$$X_1 = \ln T ;$$

$$X_2 = \ln P_p ; \quad (4.3)$$

$$X_3 = \ln D_{\kappa} .$$

Виберемо два рівня варіювання для цих незалежних змінних T, P_p, D_{κ} : верхній і нижній. Також при плануванні використовуємо повний багатофакторний експеримент 2^3 , тобто слід поставити всього чотири досліди або 2^{3-1} (таблиця 4.2).

У закодованому виді представлені рівні варіювання змінних: +1 для верхнього рівня $T_{\max}, P_{p \max}, D_{\kappa \max}$ і -1 для $T_{\min}, P_{p \min}, D_{\kappa \min}$.

За допомогою рівнянь перетворення відбувається кодування:

$$X_1 = \frac{2 \cdot (\ln T - \ln T_{\max})}{\ln T_{\max} - \ln T_{\min}} + 1 ;$$

$$X_2 = \frac{2 \cdot (\ln P_p - \ln P_{p \max})}{\ln P_{p \max} - \ln P_{p \min}} + 1 ; \quad (4.4)$$

$$X_3 = \frac{2 \cdot (\ln D_{\kappa} - \ln D_{\kappa \max})}{\ln D_{\kappa \max} - \ln D_{\kappa \min}} + 1 .$$

Таблиця 4.2 – Матриця планування експерименту 2^3

№ досліду	Матриця планування										Початкові технологічні залишкові напруження, σ_{xx} , МПа	$y = \ln \sigma_{xx}$
	Час зміцнення, с	Тиск рідини, МПа	Діаметр кульки, мм	Кодове позначення								
				X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3		
1	$T_{\min}$	$P_{p \min}$	$D_{\kappa \max}$	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$\sigma_{xx \ 1}$	y_1
2	$T_{\max}$	$P_{p \min}$	$D_{\kappa \min}$	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	$\sigma_{xx \ 2}$	y_2
3	$T_{\min}$	$P_{p \max}$	$D_{\kappa \min}$	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	$\sigma_{xx \ 3}$	y_3
4	$T_{\max}$	$P_{p \max}$	$D_{\kappa \max}$	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$\sigma_{xx \ 4}$	y_4
5	$T_{\min}$	$P_{p \min}$	$D_{\kappa \min}$	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$\sigma_{xx \ 5}$	y_5
6	$T_{\min}$	$P_{p \max}$	$D_{\kappa \max}$	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	$\sigma_{xx \ 6}$	y_6
7	$T_{\max}$	$P_{p \min}$	$D_{\kappa \max}$	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	$\sigma_{xx \ 7}$	y_7
8	$T_{\max}$	$P_{p \max}$	$D_{\kappa \min}$	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	$\sigma_{xx \ 8}$	y_8

Для визначення вільного члену b_0 рівняння (4.2), величина X_0 приймається рівною +1.

$$b_0 = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 8;$$

$$b_1 = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 8;$$

$$b_2 = (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) / 8;$$

$$b_3 = (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8) / 8; \quad (4.5)$$

$$b_{12} = (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 8;$$

$$b_{23} = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - y_7 - y_8) / 8;$$

$$b_{13} = (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8) / 8;$$

де $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8$ – логарифми фактичних значень початкових залишкових напружень для різних дослідів.

Результати експериментів наводимо в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункова матриця експерименту

№ дослідів	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$\sigma_{XX}^{ВИМ}$			y
								$\sigma_{XX}^/$	$\sigma_{XX}^{//}$	σ_{CP}	
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	6,51	6,21	6,36	1,85
2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	82,52	81,82	82,17	4,409
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	68,31	69,34	68,825	4,232
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	98,15	97,41	97,78	4,583
5	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	10,08	10,72	10,4	2,342
6	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	83,34	84,08	83,71	4,427
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	77,32	76,8	77,06	4,345
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	91,36	92,27	91,815	4,52

Тоді коефіцієнти лінійного рівняння регресії дорівнюють:

$$b_0 = (1,85 + 4,409 + 4,232 + 4,583 + 2,342 + 4,427 + 4,345 + 4,52) / 8 = 3,84;$$

$$b_1 = (-1,85 + 4,409 - 4,232 + 4,583 - 2,342 - 4,427 + 4,345 + 4,52) / 8 = 0,626;$$

$$b_2 = (-1,85 - 4,409 + 4,232 + 4,583 - 2,342 + 4,427 - 4,345 + 4,52) / 8 = 0,6;$$

$$b_3 = (1,85 - 4,409 - 4,232 + 4,583 - 2,342 + 4,427 + 4,345 - 4,52) / 8 = -0,037;$$

$$b_{12} = (1,85 - 4,409 - 4,232 + 4,583 + 2,342 - 4,427 - 4,345 + 4,52) / 8 = -0,515;$$

$$b_{23} = (-1,85 + 4,409 - 4,232 + 4,583 + 2,342 + 4,427 - 4,345 - 4,52) / 8 = 0,102;$$

$$b_{13} = (-1,85 - 4,409 + 4,232 + 4,583 + 2,342 - 4,427 + 4,345 - 4,52) / 8 = 0,037.$$

Підставивши знайдені коефіцієнти в формулу (4.2), отримаємо:

$$y = 3,84 + 0,626 \cdot X_1 + 0,6 \cdot X_2 - 0,037 \cdot X_3 - 0,515 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,102 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,037 \cdot X_1 \cdot X_3. \quad (4.6)$$

Проведемо перевірку однорідності дисперсій за критерієм Кохрена, тому що має місце однакове число повторних дослідів. Розрахунок дисперсії проводимо за наступною формулою [46], результати подамо в таблиці 4.4:

$$S^2 = \frac{\sum_1^n (\sigma_{XX}' - \sigma_{XX}^{CEP})^2}{n - 1}, \quad (4.7)$$

де σ_{XX}' – значення у кожному досліді;

σ_{XX}^{CEP} – середнє значення з повторюваних спостережень;

$n = 2$ – число спостережень.

Максимальна дисперсія спостерігається у досліді №3. Експериментальний критерій Кохрена становить:

$$G^2 = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S^2}, \quad (4.8)$$

де $S_{\max}$ – найбільша дисперсія з проведених дослідів.

Таблиця 4.4 – Розрахунок дисперсії відтворюваності

№ дослідів	$\sigma_{XX}^{'}$	$\sigma_{XX}^{''}$	$\sigma_{XX}^{СЕР}$	$\Delta\sigma_{XX}$	$(\Delta\sigma_{XX})^2$	S^2
1	6,51	6,21	6,36	0,15	0,023	0,046
2	82,52	81,82	82,17	0,35	0,123	0,246
3	68,31	69,34	68,825	-0,515	0,265	0,53
4	98,15	97,41	97,78	0,37	0,137	0,274
5	10,08	10,72	10,4	-0,32	0,102	0,204
6	83,34	84,08	83,71	-0,37	0,137	0,274
7	77,32	76,8	77,06	0,26	0,068	0,136
8	91,36	92,27	91,815	-0,455	0,207	0,414

Тоді

$$G^2 = \frac{0,53^2}{2,125} = 0,13.$$

Табличний критерій Кохрена при 5% рівні значущості при 8 дослідів дорівнює: $G = 0,63$, тобто експериментальний критерій Кохрена не перевищує значення табличного, і гіпотеза про однорідність дисперсії підтверджується.

Дисперсія відтворюваності дорівнює в даному випадку середньому арифметичному значенню дисперсій.

$$S_{(y)}^2 = 2,124 / 8 = 0,265.$$

Проведемо оцінку значущості коефіцієнтів функції (4.6) перевіркою за t – критерієм Стюдента. Визначимо дисперсію коефіцієнта регресії:

$$S_{(bj)}^2 = S_{(y)}^2 / N ; \quad (4.9)$$

$$S_{(bj)}^2 = 0,265 / 8 = 0,033 ;$$

$$S_{(bj)} = 0,182 .$$

За таблицею 9.5 [46] при 5% рівні значущості для ступенів вільності $f = 8 - (3 + 1) = 4$, критичне значення критерію Стюдента $t_{кр} = 2,776$.

Обчислимо значення Стюдента і порівняємо його з критичним значенням для кожного коефіцієнта функції (4.10), результати вкажемо в таблиці 4.5:

$$t = \frac{|b_j|}{S_{(bj)}} . \quad (4.10)$$

Запишемо рівняння (4.6) після обнуління незначущих коефіцієнтів:

$$y = 3,84 + 0,626 \cdot X_1 + 0,6 \cdot X_2 - 0,515 \cdot X_1 \cdot X_2 . \quad (4.11)$$

Проведемо оцінку адекватності моделі за критерієм Фішера за наступною формулою [46]:

$$F = \frac{S_{AD}^2}{S_{(y)}^2} , \quad (4.12)$$

де S_{AD}^2 – дисперсія адекватності:

$$S_{AD}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y - y')^2}{f} , \quad (4.13)$$

де y' – значення функції, розраховані за отриманим рівнянням лінійної регресії (4.11).

Таблиця 4.5 – Оцінка значущості коефіцієнтів

Позначення коефіцієнтів	Числове значення	Розрахункове значення коефіцієнта Стюдента	Критичне значення коефіцієнта Стюдента	Перевірка значущості
b_0	3,839	21,073	2,766	значущий
b_1	0,626	3,436		
b_2	0,602	3,305		
b_3	-0,307	0,203		незначущий
b_{12}	-0,515	2,827		значущий
b_{23}	0,102	0,56		незначущий
b_{13}	0,037	0,203		

Результати розрахунку представимо в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок дисперсії адекватності

№	y	y'	$(y - y')^2$
1	1,85	2,096	0,06052
2	4,409	4,378	0,00096
3	4,232	4,33	0,0096
4	4,583	4,552	0,00096
5	2,342	2,096	0,06052
6	4,427	4,33	0,00941
7	4,345	4,378	0,00109
8	4,52	4,552	0,00102
Сумарне значення			0,14408

$$S_{Ad}^2 = \frac{0,14408}{4} = 0,03602.$$

Критерій Фішера:

$$F = \frac{0,03602}{0,265} = 0,136.$$

За таблицею 9.4 [46] при 5% рівні значущості для $f_2 = 4$ і $f_1 = 8$, критичне значення критерію Фішера $F_{кр} = 3,8$, тому що $F = 0,136 < F_{кр} = 3,8$ лінійна модель адекватна дослідним даним.

Шляхом потенціювання лінійне рівняння (4.11) перетворимо з урахуванням формули (4.3) і отримаємо ступеневу залежність:

$$\sigma_{xx} = 46,48 \cdot T^{0,626} \cdot P_p^{0,6} \cdot D_k^{-0,037} \cdot (TP_p)^{-0,515} \cdot (P_p D_k)^{0,102} \cdot (TD_k)^{0,037}. \quad (4.14)$$

Отримана математична модель в результаті експерименту здатна передбачити значення показника оптимізації в будь-яких напрямках плану матриці з однаковою точністю. Для спрощення використання результати представимо в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Рекомендовані режими зміцнення

Показники	Початкові залишкові напруження, σ_{xx} , МПа				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Діаметр дробу $D_k = 1$ мм					
P_p , МПа	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
T , с	2	15	65	120	220
Діаметр дробу $D_k = 1,5$ мм					
P_p , МПа	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
T , с	2	12	60	115	210
Діаметр дробу $D_k = 2,0$ мм					

P_p , МПа	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
T , с	2	10	55	110	200

4.4 Оцінка експлуатаційної надійності

При базі випробувань 10^6 циклів в симетричному циклі навантаження, межа обмеженої витривалості зразків з знеуглецьованим шаром склала $\sigma_{-1Д} = 330$ МПа, а при асиметричному циклі навантаження $\sigma_{-1Д} = 320$ МПа. Межа обмеженої витривалості зразків, зміцнених ГДО, склала $\sigma_{-1Д_{зм}} = 425$ МПа.

За результатами випробування на втому (рисунок 4.5) застосування ГДО поверхневого шару підвищує експлуатаційну надійність за критерієм коефіцієнта впливу поверхневого зміцнення:

$$K_v = 425 / 330 = 1,28.$$

Рисунок 4.5 – Опір втоми зразків з чавуну АХНММ: 1 – симетричний цикл;
2 – асиметричний цикл; 3 – крива втоми без зміцнення;
4 – крива втоми зі зміцненням

Застосування технології ГДО при виготовленні циліндрових втулок має суттєві переваги перед існуючою технологією в даний час.

Висновки до розділу 4

1 Проведено дослідження мікроструктури поверхневого шару циліндрової втулки. Товщина зміцненого шару коливається в межах 0,05-0,15 мм.

2 Гідродробоструминне зміцнення дозволяє створювати сприятливі напруження стиску на різних ділянках поверхні циліндрової втулки. На глибину проникнення початкових залишкових напружень впливає енергія удару дробом, інтенсивність деформації в часі поверхневого шару втулки, а також енергетичні можливості і продуктивність установки ГДУ-5.

3 Апробована експериментально технологія ГДО з варіюванням різних факторів. Отримана математична модель в натуральних значеннях для визначення початкових залишкових напружень залежно від режимів зміцнення.

4 Проведено оцінювання експлуатаційної надійності циліндрових втулок. Застосування ГДО поверхневого шару підвищує експлуатаційну надійність за критерієм коефіцієнта впливу поверхневого зміцнення.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

Для впровадження технологічного методу обробки циліндрових втулок на підприємстві ПрАТ «Строммашина» (м. Хмельницький) необхідно передбачити вкладення певних інвестицій, витрати на додаткове обладнання і засоби обслуговування.

Застосування технологічного методу гідродробоструминної обробки (ГДО) в існуючому технологічному процесі передбачає скорочення часу обробки чорнкової токарної операції і виключення чистової токарної операції зовнішньої поверхні циліндрової втулки, а також зміна форми заготовки, наближеної до форми готового виробу, за рахунок зниження залишкових напружень після литва.

Дані припущення лягли в основу розрахунку загального економічного ефекту (таблиці 5.1-5.5), що визначається за такою формулою:

$$E = \Delta C - E_n \cdot \Delta K, \quad (5.1)$$

де ΔC – різниця собівартості порівнюваних варіантів до і після впровадження технологічного методу ГДО циліндрової втулки;

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

ΔK – різниця капітальних витрат для порівнюваних варіантів до і після впровадження технологічного методу ГДО циліндрової втулки.

Таблиця 5.1 – Основні дані розрахунку

Показники	Варіанти порівняння	
	До впровадження ГДО	Після впровадження ГДО
1	2	3
Річна програма випуску циліндрових втулок дизеля 6ЧН21/21, шт.	1200	1200
Штучний час обробки, н./год.	10,45	8,3

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
Середній розряд робітників	4,4	4,1
Потужність верстата, кВт	11	11
Вартість 1 кВт·год. енергії, грн.	5,5	5,5
Баланс вартості обладнання, грн.	2636563	2169375
Дійсний річний фонд обладнання, год.	4015	4015
Амортизація обладнання, %	12	12
Площа на 1 верстат, м ²	14,2	14,2
Коефіцієнт на додаткову допоміжну площу	2,0	2,0
Вартість 1 м ² площі, грн.	2600	2600
Середня вартість заготовок на програму, грн.	1342575	1045931
Вартість основних матеріалів на програму, грн.	535031	399100
Витрати матеріалу на одну деталь, кг	48,8	36,4
Число змін обладнання	2	2
Кількість верстатів, шт.	10	6
Кількість робітників, чол.	8	4
Коефіцієнт використання матеріалу	0,61	0,82
Площа ділянки, м ²	672	504
Коефіцієнт завантаження обладнання	0,73	0,82

Таблиця 5.2 – Фонд заробітної плати

Найменування статей витрат	Варіанти порівняння	
	До впровадження ГДО	Після впровадження ГДО
Заробітна плата основних робітників з нарахуваннями, грн.	371727	303339
Заробітна плата допоміжних робітників з нарахуваннями, грн.	151734	115952
Загальний фонд, грн.	523461	419291

Таблиця 5.3 – Балансова вартість основних фондів ділянки

Найменування фондів	До впровадження ГДО		Після впровадження ГДО	
	Витрати, грн.	Амортизація, грн.	Витрати, грн.	Амортизація, грн.
Будівлі та споруди	161280	4032	120960	3024
Виробниче та допоміжне обладнання	2636563	316386	2169375	260325
Енергетичне обладнання	51935	6232	42728	5127
Транспортне, вантажопідйомне обладнання	259676	31161	213639	25637
Інструмент та пристосування	129838	38951	106819	32046
Виробничий інвентар	77903	9348	64092	7691
Усього	3317195	406110	2717613	333850

Таблиця 5.4 – Розрахунок витрат на силову енергію

Найменування	Варіанти порівняння	
	До впровадження ГДО	Після впровадження ГДО
Річний фонд роботи обладнання, год.	4015	4015
Встановлена потужність, кВт·год.	110	66
Вартість 1 кВт·год. енергії, грн.	5,5	5,5
Коефіцієнт попиту	0,6	0,6
Усього, грн.	582978	349787

Таблиця 5.5 – Зведені дані для розрахунку загального економічного ефекту

Показники	До впровадження ГДО	Після впровадження ГДО	Різниця показника
1	2	3	4
1 Річна програма випуску циліндрових втулок дизеля 6ЧН21/21, шт.	1200	1200	-
2 Собівартість готового випуску	C_1	C_2	$\Delta C = C_1 - C_2$
Заробітна плата робітників, грн.	523461	419291	104170
Амортизація, грн.	406110	333850	72260
Витрати на утримання виробничої площі, грн.	161280	120960	40320
Витрати на силову електроенергію, грн.	582978	349787	233191
Вартість основних матеріалів, грн.	535031	399100	135931
Витрати на заготовки, грн.	1342575	1045931	296644
Усього, грн.	-	-	882516

Продовження таблиці 5.5

1	2	3	4
Капітальні вкладення:	K_1	K_2	$\Delta K = K_1 - K_2$
Балансова вартість основних фондів, грн.	3317195	2717613	599582
Єдиначасові витрати на технологічне оснащення, грн.	199032	163057	35975
Єдиначасові витрати на підготовку кадрів, грн.	23884	19567	4317
Усього, грн.	-	-	639874

На підставі даних таблиці 5.5, загальний економічний ефект (5.1) від впровадження технологічного методу гідродробоструминної обробки циліндрових втулок становить:

$$E = 882516 - 0,15 \cdot 639874 = 786535 \text{ грн.}$$

Висновки до розділу 5

Економічна ефективність від застосування технологічного методу гідродробоструминної обробки деталей машин на прикладі циліндрових втулок становить 786535 грн. Економічний ефект зумовлений зниженням собівартості та капітальних витрат.

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

В результаті виконаних теоретичних і експериментальних досліджень зроблені висновки.

1 Здійснено оцінку віброударного навантаження циліндрової втулки під час гідродробоструминної обробки. При оцінці початкових технологічних залишкових напружень необхідно враховувати динаміку навантаження через коефіцієнт динамічності, величина якого досягає 1,21. Проведена оцінка експлуатаційної надійності за терміном служби. Напрацювання становить 29150 год., що відповідає вимогам.

2 Розроблена методика проведення експериментальних досліджень: мікроструктури поверхні, величини залишкових напружень та оцінювання експлуатаційної надійності здійснювати за коефіцієнтом впливу поверхневого зміцнення на межу витривалості.

3 Експериментально визначено величина залишкових напружень. Товщина зміцненого шару внаслідок ГДО коливається в межах 0,05-0,15 мм. Розроблено регресійну модель залежності початкових залишкових напружень від режимів зміцнення (часу, тиску рідини і розміру дробу) з перевіркою адекватності.

4 Економічна ефективність від застосування технологічного методу гідродробоструминної обробки циліндрових втулок (ПрАТ «Строммашина», м. Хмельницький) становить 786535 грн. Економічний ефект зумовлений зниженням собівартості та капітальних витрат.