

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ ТЕПЛОВИЗНИХ ДИЗЕЛІВ НА ОСНОВІ НОВИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

Пояснювальна записка і розрахунки
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 530.10.01 ПЗ

Розробив студент групи 211-ЛЛГ-Д24
спеціальності 273 Залізничний транспорт
Освітня програма: «Локомотиви та
локомотивне господарство»
(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

_____ Антон ПОПОК
(підпис)

Керівник:

ст. викладач кафедри ЕРРС,

Віталій КОВАЛЕНКО

Рецензент:

доц. кафедри ІВ та ЯП, к.т.н

Андрій РИБІН

2025 р.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 273. Залізничний транспорт

Освітня програма Локомотиви та локомотивне господарство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,

професор, д-р техн. наук

_____ В.Г. Пузир

(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Попок Антону Юрійовичу

1. Тема «Розроблення пропозицій щодо підвищення зносостійкості гільз циліндрів тепловозних дизелів на основі нових технологічних рішень»
керівник Коваленко Віталій Іванович, ст.викладач
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «06» жовтня 2025 року № 49.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «25» грудня 2025 року.
3. Вихідні дані Методичні вказівки по збору статистичної інформації в локомотивних депо(№471)
4. 1 Аналіз стану проблеми та шляхів підвищення довговічності гільз циліндрів тепловозних дизелів. 1.1 Конструктивні особливості та умови експлуатації гільз циліндрів тепловозних дизелів. 1.2 Аналіз характерних пошкоджень та причин втрати працездатності гільз циліндрів тепловозних двигунів. 2 Теоретичне обґрунтування напружено-деформованого стану гільзи циліндра в умовах експлуатації. 2.1 Математичне моделювання напруженого стану гільзи від дії сил інерції та тиску газів. 2.2 Методика розрахунку температурних напружень та їх вплив на внутрішню поверхню гільзи. 2.3 Дослідження напружено-деформованого стану гільзи методом кінцевих елементів. 3 Розроблення комплексної технології зміцнення гільз циліндрів. 3.1 Обґрунтування вибору комплексної технології диференційованого зміцнення зон. 3.2 Розроблення технологічного процесу гідродробеструйного зміцнення зовнішньої поверхні. 3.3 Розроблення технології плазмового зміцнення внутрішньої поверхні циліндрової втулки дизеля. 4 Економічний ефект від впровадження технологічного методу диференційованого гідродробеструйного зміцнення циліндрових втулок.

5. Перелік графічного матеріалу 1 Загальна характеристика магістерської роботи. 2 Задачі та склад магістерської роботи. 3 Дизель-генератор ДГР 500/1500 с дизелем 6ЧН21/21. 4 Аналіз дефектів циліндрових втулок. 5 Методика розрахунку напруженого стану циліндрової втулки дизеля. 6 Розрахункові еквівалентні напруги в циліндровій втулці дизеля 6ЧН 21/21 методом кінцевих елементів. 7 Автоматична гідроабразивна установка КС-100А3Д. 8 Схема диференційованого гідродробеструйного зміцнення циліндрової втулки дизеля. 9 Напівавтомат для напилення покриття на внутрішню поверхню циліндрової втулки. 10 Структура технологічного процесу плазмового напилювання покриттів.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування			

7 Дата видачі завдання «б» жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	2.10–15.10	
2	Збирання та обробка статистичної інформації	16.10–25.10	
3	Виконання роботи по розділам дипломного проекту. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	26.10–3.11	
4	Перевірка виконаних завдань у керівника дипломного проекту, виправлення помилок, виконання робіт по розділам консультантів	4.11–26.11	
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	27.11–6.12	
6	Перевірка виконаних робіт у керівника проекту, виправлення помилок, чистове виконання розділів дипломного проекту	7.12–19.12	
7	Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	20.12–25.12	

Студент _____ Попок А.Ю.

(підпис)

Керівник _____ Коваленко В.І.

(підпис)

Зміст

Вступ	7
1 Аналіз стану проблеми та шляхів підвищення довговічності гільз циліндрів тепловозних дизелів	10
1.1 Конструктивні особливості та умови експлуатації гільз циліндрів тепловозних дизелів	10
1.2 Аналіз характерних пошкоджень та причин втрати працездатності гільз циліндрів тепловозних двигунів	14
1.3 Огляд існуючих технологічних методів зміцнення та відновлення робочих поверхонь гільз	21
1.4 Аналіз методів оцінки напружено-деформованого стану гільз циліндрів тепловозних дизелів	24
2 Теоретичне обґрунтування напружено-деформованого стану гільзи циліндра в умовах експлуатації	28
2.1 Математичне моделювання напруженого стану гільзи від дії сил інерції та тиску газів	28
2.2 Методика розрахунку температурних напружень та їх вплив на внутрішню поверхню гільзи	40
2.3 Дослідження напружено-деформованого стану гільзи методом кінцевих елементів	47
2.4 Моделювання віброударного навантаження гільзи в процесі гідродробеструйного зміцнення	53
3 Розроблення комплексної технології зміцнення гільз циліндрів	62
3.1 Обґрунтування вибору комплексної технології диференційованого зміцнення зон	62

					<i>МКРМЕ 530.10.04 ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Попок				Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Коваленко					4	111
Реценз.	Рибін				УкрДУЗТ		
Н. Контр.	Анацький						
Затверд.	Пузир						
					Розроблення пропозицій щодо підвищення зносостійкості гільз циліндрів тепловозних дизелів на основі нових технологічних рішень		

3.2 Розроблення технологічного процесу гідродробеструйного зміцнення зовнішньої поверхні	63
3.3 Розроблення технології плазмового зміцнення внутрішньої поверхні циліндрової втулки дизеля	80
3.4 Вибір обладнання та технологічного оснащення для реалізації запропонованих рішень	96
4 Економічний ефект від впровадження технологічного методу диференційованого гідродробеструйного зміцнення циліндрових втулок	98
Висновки по роботі	107
Список використаних джерел	109

					<i>МКРМЕ 530.10.05 ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 11 слайдів презентації та 111 аркушів пояснювальної записки формату А4, що містить 40 рисунків, 16 таблиць та 29 літературних джерел.

Ключові слова: ТЕПЛОВИЗНИЙ ДИЗЕЛЬ, ГІЛЬЗА ЦИЛІНДРА, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ГІДРОДРОБОСТРУМИННЕ ЗМІЦНЕННЯ.

Мета роботи. Завданням дослідження є підвищення експлуатаційної надійності та довговічності гільз циліндрів тепловозних дизелів шляхом впровадження нових технологічних рішень для керування властивостями поверхневого шару.

Об'єкт дослідження – циліндрові втулки дизелів типу 6ЧН 21/21.

Предмет дослідження – розробка технології ремонту та зміцнення втулок циліндрових дизелів методами поверхневої обробки.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення зносостійкості та ресурсу гільз циліндрів тепловозних дизелів шляхом удосконалення технології їх поверхневого зміцнення. В ній обґрунтовано та розроблено комплексну методику диференційованої гідродробеструйної та плазмової обробки, що базується на детальному аналізі напружено-деформованого стану деталі.

ABSTRACT

This qualification paper consists of 11 presentation slides and 111 pages of the explanatory note (A4 format), containing 40 figures, 16 tables, and 29 references.

Keywords: LOCOMOTIVE DIESEL ENGINE, CYLINDER LINER, WEAR RESISTANCE, STRESS-STRAIN STATE, FINITE ELEMENT METHOD, HYDRO-SHOT PEENING (HYDRO-BLASTING HARDENING).

Purpose of the work. The objective of the research is to improve the operational reliability and durability of locomotive diesel cylinder liners by implementing new technological solutions for controlling the properties of the surface layer.

Object of research: cylinder liners of 6ChN 21/21 type diesel engines.

Subject of research: development of technology for the repair and hardening of diesel cylinder liners using surface treatment methods.

Summary. The thesis is dedicated to solving the relevant scientific and practical problem of increasing the wear resistance and service life of locomotive diesel cylinder liners by improving their surface hardening technology. The paper substantiates and develops a comprehensive methodology for differentiated hydro-shot peening and plasma treatment, based on a detailed analysis of the component's stress-strain state.

Вступ

Фундаментальною основою безперебійного функціонування залізничного транспорту України є оптимізація системи експлуатації та ремонту тягового рухомого складу. Аналіз тенденцій у провідних промислових країнах свідчить про зміну парадигми технічного обслуговування: перехід від планово-попереджувальних ремонтів до стратегії подовження життєвого циклу техніки через її глибоку модернізацію. Удосконалення технологічних процесів відновлення деталей є найбільш ефективним інструментом, що дозволяє отримати значну економічну вигоду при мінімальних витратах на оновлення основних фондів.

На сьогоднішній день керівні нормативні документи АТ «Укрзалізниця» констатують факт критичного вичерпання призначеного ресурсу переважної більшості локомотивного парку. Ситуація характеризується як передкризова: середній вік експлуатованого парку перетнув психологічну та технічну позначку в 30 років. Деталізація за видами тяги показує, що для маневрових тепловозів цей показник становить 29 років, а для магістральних — 24 роки. З урахуванням того, що фізичний знос магістральних тепловозів досягає рівня 90%, подальша експлуатація такої техніки без впровадження компенсуючих заходів становить загрозу для стабільності та безпеки національної транспортної системи.

З огляду на значне моральне та фізичне застаріння техніки, єдиним реалістичним сценарієм забезпечення перевізного процесу в осяжній перспективі є раціональне використання наявного парку шляхом подовження його ресурсу. У зв'язку з цим, останніми роками за завданнями Укрзалізниці інтенсифіковано виконання науково-технічних досліджень, метою яких є обґрунтування можливості понаднормової експлуатації ТРС без погіршення показників надійності. Ключовим завданням є пошук оптимального балансу між організаційними заходами з подовження експлуатації, технічною

модернізацією вузлів та підготовкою відповідної ремонтної бази, здатної реалізувати нові технологічні регламенти.

Проте слід усвідомлювати, що тенденції до подовження строку служби дизелів мають і зворотний бік: неминуче зростає величина динамічної напруженості ключових деталей кривошипно-шатунного механізму та циліндро-поршневої групи. Тривала дія циклічних навантажень призводить до зниження межі витривалості металу, що викликає нагальну необхідність використання всіх доступних факторів підвищення ресурсу.

Особливої гостроти набуває проблема надійності циліндрових втулок (гільз). Збільшення циліндрової потужності сучасних та модернізованих дизелів призводить до зростання габаритних розмірів втулок та підвищення механічних навантажень на них. Досвід експлуатації показує необхідність ретельної перевірки надійності цих деталей саме за критерієм «втомна міцність», оскільки переважна більшість аварійних відмов викликана втомним руйнуванням у критичних перерізах з наявністю концентраторів напружень [1]. Таким чином, подальша безпечна експлуатація дизелів вимагає проведення спеціальних досліджень щодо підвищення конструкційної міцності циліндрових втулок, зокрема методами поверхневого пластичного деформування (ППД).

Актуальність застосування зміцнення поверхневим пластичним деформуванням у ресурсозберігаючому процесі ремонту пояснюється специфікою роботи гільзи. По-перше, поверхневий шар втулки в умовах експлуатації має знижений опір втомі через постійне зародження мікротріщин, вплив корозії та інтенсивне зношування. По-друге, розрахунки показують, що максимальні динамічні напруження від згину та кручення, які є головними видами навантаження, локалізуються саме в приповерхневих шарах матеріалу. Створення поля залишкових напружень стиску методом ППД дозволяє ефективно протидіяти цим руйнівним процесам.

Актуальність роботи – викликана необхідністю досліджень, які дозволяють точно визначити картину розподілу напружень на складних поверхнях з різним змінним перетином під дією реальних робочих навантажень

(в даному випадку сукупна дія інерційних сил, сил робочого тиску газів і температурного поля). Відсутня науково-обґрунтована технологія активного вирівнювання цих напруг у при поверхневому шарі циліндрової втулки, яка спрямована на цільове підвищення втомної міцності в різних ділянках, залежно від локального напружено-деформованого стану гільзи.

З метою ефективного зниження утворення втомних тріщин і зони концентрації напружень від циклічних робочих навантажень необхідно цілеспрямовано впливати на ці критичні ділянки за допомогою зміцнюючих методів поверхневого пластичного деформування (зокрема, гідродробеструмним).

Об'єкт дослідження – циліндрові втулки дизелів типу 6ЧН 21/21.

Предмет дослідження – розробка технології ремонту та зміцнення втулок циліндрових дизелів методами поверхневої обробки.

Елементи наукової новизни – полягають в обґрунтуванні методики технологічного забезпечення зміцнення зовнішньої поверхні гільзи циліндра. Запропонований підхід базується на детальному аналізі напружено-деформованого стану деталі під дією експлуатаційних навантажень, що дозволяє здійснювати точний розрахунок режимів поверхневого пластичного деформування. Це забезпечує можливість керованого формування поля залишкових напружень уздовж складного геометричного профілю поверхні, що є критичною умовою для підвищення циклічної міцності та подовження ресурсу виробу.

Практичне значення отриманих результатів викладені у доповіді на студентській конференції, тези доповіді Попок А.Ю. «Техніко-економічне обґрунтування застосування зносостійких покриттів для відновлення гільз циліндрів тепловозних дизелів з оцінкою потенційного зниження витрати палива», яка опублікована у збірнику тез доповідей студентської науково-технічної конференції 10-11 грудня. Харків, 2025. № 85

Список використаних джерел

- 1 Тартаковський Е.Д. Якість ремонту та надійність тепловозів [Текст]/Е.Д. Тартаковський - К.: Транспорт, 1973. - 81с.
- 2 Одинцов Л.Г. Зміцнення та оздоблення деталей поверхневим пластичним деформуванням [Текст]/Л.Г.Одінцов. - К.: Машинобудування, 1987. - 327 с.
- 3 Серенсен С.В. Несуча здатність та розрахунок деталей машин на міцність. Керівництво та довідковий посібник [Текст]/С.В. Серенсен та ін - К.: Машинобудування, 1975. - 468 с.
- 4 Євдокимов В.Д. Технологія зміцнення машинобудівних матеріалів: Навчальний посібник-довідник [Текст]/В.Д.Євдокімов, Л.П. Клименко, А.Н.Євдокімова. - Одеса: Вид-во НДГУ ім. Петра Могили, 2005. - 352 с.
- 5 Подій А.В. Технологічні залишкові напруги [Текст]/А.В. Подій, А.М. Суліма, М.І. Євстигнєєв та ін - К.: Машинобудування, 1973. - 216 с.
- 6 Кравчук В.С. Опір деформуванню та руйнуванню поверхнево-зміцнених деталей машин та елементів конструкції [Текст]: монографія / В.С. Кравчук, О.О. Юсеф, А.В. Кравчук. - Одеса: Астропринт, 2000. - 160 с.
- 7 Бабічов А.П. Довідник інженера-технолога у машинобудуванні [Текст]/А.П. Бабичев та ін. – Київ: Фенікс, 2005. – 541 с.
- 8 Цветков В.Т. Двигуни внутрішнього згоряння [Текст]/В.Т. Квітки. - Харків: ХДУ, 1960. - 656 с.
- 9 Кудрявцев І.В. Сучасний стан та основні напрямки в галузі зміцнення деталей машин поверхневою наклепом [Текст] / І.В. Кудрявці. - К.: Машгіз, 1958. - 43 с.
- 10 Мішин І.А. Довговічність двигунів [Текст]/І.А. Мішин. - К.: Машинобудування, 1976. - 69 с.
- 11 Кудрявцев І.В. Втома великих деталей машин [Текст]/І.В. Кудрявцев. - К.: Машинобудування, 1981. - 240 с.

12 Дроздов Ю.М. Тертя та знос в екстремальних умовах [Текст]/Ю.М. Дроздов та ін - К.: Машинобудування, 1986. - 224 с.

13 Сінчурін Д.В. Аналіз безвідходних технологічних методів підвищення працездатності циліндрових втулок. [Текст]/Д.В. Сінчурін, Н.Л. Мар'їна // Математичні методи в техніці та технологіях ММТТ - 25: XXV Міжнародна наукова конференція. Збірник праць. – Київ, 2012. – с. 36-38.

14 Кудрявцев І.В. Внутрішня напруга як резерв міцності в машинобудуванні [Текст]/І.В. Кудрявцев. - К.: Машгіз, 1951. - 277 с.

15 Кудрявцев І.В. Сучасний стан та практичне застосування ППД [Текст]/І.В. Кудрявцев// Вісник машинобудування. - 1972. - №1. - С. 35-38.

16 Горохів В.А. Обробка деталей пластичним деформуванням [Текст]/В.А. Горохів. - Київ: Техніка, 1978. - 192 с.

17 Маталін А.А. Технологічні методи підвищення довговічності деталей машин [Текст]/О.О. Маталін. - Київ: Техніка, 1971. - 144 с.

18 Папшев Д.Д. Оздоблювально-зміцнююча обробка поверхневим пластичним деформуванням [Текст]/Д.Д. Папшев. - К.: Машинобудування, 1978. - 152 с.

19 Риковський Б.П. Місцеве зміцнення деталей поверхневою наклепом [Текст]/Б.П. Риковський, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинін. - К.: Машинобудування, 1985. - 152 с.

20 Пахолко В.В. Дослідження монтажних та динамічних напруг у циліндрових втулках судових малооборотних дизелів [Текст] / В.В. Пахолко // Двигунобудування. - 1983. - №1. - С. 20-22.

21 Косирєв С.П. Експлуатаційна надійність за зміцнювальних технологічних способів обробки деталей машин [Текст] / С.П. Косирєв, І.О. Кудашева, А.А. Землянський. - ДІТ, 2010. - 88 с.

22 Чистяков В.К. Динаміка поршневих та комбінованих двигунів внутрішнього згоряння [Текст]: Навчальний посібник/В.К. Чистяків. - К.: Машинобудування, 1989. - 256 с.

23 Бутов А.У. Розрахунок напруг та деформацій щільноміцних фланцевих з'єднань кільцевих деталей гідротурбін [Текст] / О.У. Бутов// Проблеми міцності в машинобудуванні. Збірник. - Київ, 1962. - 9. - с. 77-95.

24 Волошин А.А. Розрахунок та конструювання фланцевих з'єднань [Текст] / А.А. Волошин, Г.Т. Григор'єв. - К.: Машинобудування, 1972. - 180 с.

25 McCune Thermal Spraying of Cylinder Bore Surfaces for Aluminium Engine Blocks [Text] /Welding Journal, №1, August 1995, p. 41-47.

26 Barbezat G., Keller S., Wuest G. Internal Plasma Spray Process for Cylinder Bores in Automotive Industry [Text] / Proc. of the 15th Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May 1998, Nice, France, Vol.2, p. 963-974

27 Демідов В.Д. Шляхи збільшення ресурсу роботи циліндро-поршневої групи в дизельних двигунах (плазмові технології у відновленні та зміцненні деталей) [Текст] / Залізниця • світу, 2004 №6 (70), с. 103.

28 Хмелевська В.Б. Основи технології відновлення деталей дизелів методом газотермічного напилення [Текст]. Дисертація на здобуття наукового ступеня д.т.н. Київ, 1996., 334 с.

29 Хамзін Р.М. Вплив металокерамічного покриття на знос циліндрової втулки та поршневого кільця. [Текст] / "Тертя, знос, мастило" - Науково-технічний електронний журнал, том 2, № 1, березень 2000 р.