

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Володимира Даля
КАФЕДРА ЗАЛІЗНИЧНОГО, АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ТА
ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА
НА ТЕМУ:**

**«Дослідження залишкового ресурсу несучих конструкцій
маневрових локомотивів»**

Обсяг роботи: - графічна частина – 10 слайдів;
- пояснювальна записка – 59 с.

**Студент групи ЗТ-22д
Керівник роботи**

**Гусєв М. А.
к.т.н. Ковтанець М. В.**

Київ 2026

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут транспорту і будівництва
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної випускної роботи

освітній ступінь	<u>бакалавр</u> (бакалавр, магістр)
спеціальність	<u>273 Залізничний транспорт</u> (шифр і назва спеціальності)
спеціалізація	<u>Локомотиви та локомотивне господарство</u> (назва спеціалізації)

на тему «Дослідження залишкового ресурсу несучих конструкцій маневрових локомотивів»

Виконав: студент групи ЗТ-22д	_____	<u>Гусєв М А.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Керівник	_____	<u>Ковтанець М. В.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Завідувач кафедри	_____	<u>Климаш А. О.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Рецензент	_____	_____
	(підпис)	(ініціали і прізвище)

Київ - 2026

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут транспорту і будівництва
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
(повна назва кафедри)

Освітній ступінь бакалавр
(бакалавр, магістр)

спеціальність 273 Залізничний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

спеціалізація Локомотиви та локомотивне господарство
(назва спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

“ ____ ” _____ 20 ____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гусєв Максим Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **«Дослідження залишкового ресурсу несучих конструкцій маневрових локомотивів»**

Керівник роботи Ковтанець Максим Володимирович, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджений наказом університету від “ ____ ” _____ 20 ____ року № ____

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Оцінка ресурсу несучих конструкцій рухомого складу за допомогою динаміко-міцнісних випробувань. Взаємодія колії та рухомого складу залізниць. Залишковий ресурс несучих конструкцій тягового рухомого складу залізниць.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз технічного стану несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації. 2. Дослідження стану найбільш ушкоджуваних зон несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації. 3. Дослідження напружено-деформованого стану рами візка маневрового локомотиву при дії статичних і динамічних навантажень. 4. Статичний розрахунок рами візка маневрового тепловоза

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

- | | |
|--|---------|
| 1. Мета, об'єкт та задачі дослідження | - 2 сл. |
| 2. Частка зал. тран. у структурі загального вантажообігу України | - 2 сл. |
| 3. Експлуатаційний парк АТ «Укрзалізниця» | - 1 сл. |
| 4. Аналіз по возрасту маневрових локомотивов ТЭМ2 | - 1 сл. |
| 5. Напружено-деформований стан рами візка | - 1 сл. |
| 6. Результати дослідження | - 2 сл. |
| 7. Висновки | - 1 сл. |

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «16» березня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапів виконання кваліфікаційної випускної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ. Актуальність проблеми. Постановка задачі дослідження, обґрунтування об'єкту дослідження		
2	Аналіз технічного стану несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації		
3	Дослідження стану найбільш ушкоджуваних зон несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації		
4	Дослідження напружено-деформованого стану рами візка маневрового локомотиву при дії статичних і динамічних навантажень		
5	Статичний розрахунок рами візка маневрового тепловоза		
6	Представлення результатів дослідження		
7	Підготовка ілюстративного матеріалу до захисту кваліфікаційної випускної роботи		
8	Пояснювальна записка до кваліфікаційної випускної роботи		

Студент

(підпис) Гусєв М. А.
(ініціали і прізвище)

Керівник роботи

(підпис) Ковтанець М. В.
(ініціали і прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна випускна робота: 59 с., 28 рис., 16 бібл. назв,
10 слайдів.

Ключові слова: несучі конструкції, локомотивний парк, залишковий ресурс, експлуатація, маневровий локомотив.

Робота присвячена науково-технічному обґрунтуванню залишкового ресурсу несучих конструкцій маневрових локомотивів, які експлуатуються на залізницях України, для забезпечення їхньої безпечної експлуатації.

Ключовим аспектом у визначенні терміну служби локомотивів є оцінка довговічності їх тримальних конструкцій, яка заснована на принципах механіки втомного руйнування. Експлуатаційні навантаження циклічного характеру ініціюють у матеріалі процес накопичення пошкоджень, що лімітує ресурс екіпажу. Особлива увага при цьому приділяється зварним з'єднанням, що є концентраторами напруг і визначальною ланкою міцності втомних конструкцій.

В роботі проведено аналіз існуючих методик та підходів до оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій рухомого складу, в результаті якого встановлено, що застосовувані розрахункові схеми недостатньо враховують специфіку експлуатації маневрових локомотивів, зокрема спектральний склад навантажень, вплив стикових нерівностей та локальний характер ушкоджуваності. Показано необхідність комплексного розрахунково-експериментального підходу, що ґрунтується на уточненні динамічної навантаженості та обліку фактичних характеристик матеріалу.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Реферат			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.	Гусєв										
Перевір.	Ковтанець									3	
Консульт.								СНУ ім. В. Даля Кафедра ЗАТ ПТМ			
Н. Контр.											
Затверд.											

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ	7
1.1 Загальний стан залізниць України та аналіз показників їх діяльності	7
1.2 Сучасний стан локомотивного парку залізниць України	9
1.3 Огляд наукових праць за оцінками довговічності та ресурсу несучих конструкцій рухомого складу	16
1.4 Дослідження стану найбільш ушкоджуваних зон несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації	22
1.5 Оцінка механічних властивостей матеріалу несучої конструкції маневрового локомотива після закінчення терміну служби	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РАМИ ВІЗКА МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	38
2.1 Аналіз методів математичного моделювання механіки твердого тіла, яке деформується	38
2.2 Підготовка вихідних даних до виконання статичного розрахунку	45
2.3 Статичний розрахунок рами візка маневрового тепловоза	48
2.4 Оцінка напружено-деформованого стану конструкції рами візка тепловоза за напругою, яка допускається	50
ВИСНОВКИ	56
ЛІТЕРАТУРА	58

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У рамках стратегічного розвитку транспортної інфраструктури України з акцентом на залізничну галузь реалізується комплекс заходів, спрямованих на будівництво та електрифікацію ділянок для експлуатації високошвидкісного рухомого складу, удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту, а також забезпечення надійності та технічної справності локомотивів у процесі експлуатації.

Особлива увага приділяється поповненню парку локомотивами, які мають покращені техніко-економічні характеристики, що сприяє підвищенню ефективності та стійкості транспортної системи. Враховуючи дефіцит рухомого складу, актуалізується потреба у розробці та впровадженні програм, що забезпечують підвищення продуктивності маневрових локомотивів для відповідності зростаючим обсягам вантажоперевезень. Одним із ключових напрямів покращення ефективності локомотивного парку є реалізація комплексних заходів щодо визначення та наукового обґрунтування оцінки залишкового ресурсу маневрових локомотивів.

Сучасна стратегія розвитку «Укрзалізниці» (УЗ) спрямована на глибоку євроінтеграцію, масштабну модернізацію інфраструктури та фінансову трансформацію, поділену на етапи до 2027 та 2030 років. У цих етапах визначено важливі завдання, такі як:

- розвиток єдиної транспортної системи у взаємозв'язку з усіма видами транспорту;
- розвиток ринку транспортних та логістичних послуг та інфраструктури;
- розширення «зелених коридорів» та транзитних можливостей у транспортній системі;
- зниження собівартості та витрат на пасажирські та вантажні перевезення;

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

- розвиток залізничної інфраструктури;
- оновлення парку локомотивів та вагонів.

Одним із таких напрямків для забезпечення безпеки експлуатації рухомого складу та обґрунтування надійності рамних конструкцій є оцінка залишкового ресурсу рамних конструкцій маневрових локомотивів та запасу їх міцності при тривалій експлуатації.

В умовах зростання інтенсивності експлуатації та старіння парку тягового рухомого складу вимоги безпеки зумовлюють необхідність науково обґрунтованого визначення призначеного терміну служби локомотивів. Актуалізується встановлення термінів експлуатації з урахуванням дослідження розрахунково-експериментального підтвердження ресурсу безпечної роботи.

Об'єкт дослідження – несучі конструкції (головна рама та рама візка) маневрових локомотивів.

Предмет дослідження – залишковий ресурс несучих конструкцій маневрових локомотивів, методи його визначення та їх застосування для прогнозування безпечного терміну служби рухомого складу.

Метою дослідження є науково-технічне обґрунтування залишкового ресурсу несучих конструкцій маневрових локомотивів, які експлуатуються на залізницях України, для забезпечення їхньої безпечної експлуатації.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Загальний стан залізниць України та аналіз показників їх діяльності

Залізничний транспорт є ключовим елементом транспортної інфраструктури України, забезпечуючи значну частку вантажо- та пасажироперевезень за умов прямого доступу до морських шляхів.

У структурі вантажообігу України залізничний транспорт займає домінуюче становище, забезпечуючи понад 63% загального обсягу перевезень, що є особливо важливим для транспортування вантажів на значні відстані та свідчить про його ключову роль у транспортній системі (рисунок 1.1). Автомобільний транспорт займає друге місце із показником 30%, виконуючи функцію забезпечення регіональних та місцевих перевезень. Трубопровідний (5,3%) та повітряний (1,7%) транспорт займає нішеві позиції у загальній транспортній системі [8].

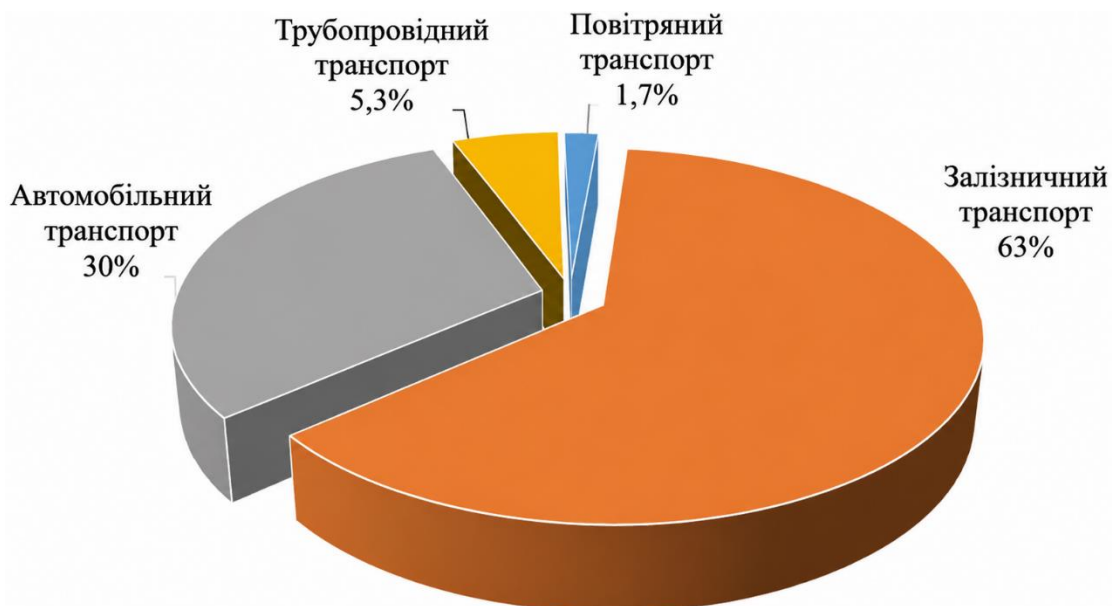


Рисунок 1.1 – Частка залізничного транспорту у структурі загального вантажообігу України за 2021 р.

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-22д.02 ПЗ

Арк.

7

Такий розподіл відображає пріоритет магістральних перевезень, що забезпечують зв'язок між ключовими економічними центрами та міжнародними коридорами при помірній частці інфраструктури для маневрових операцій та обслуговування промислових об'єктів (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Схема розташування регіональних залізничних управлінь України

Швидкісний режим мережі залізниць є важливим показником її технологічної зрілості.

Якщо говорити про залізниці України в сучасному розумінні швидкісного руху (до 160 км/год), то довжина ділянок, якими курсують поїзди Intercity/Intercity+, становить приблизно 1600 км (таблиця 1.1).

Тоді частка швидкісних ліній становить орієнтовно 7% загальної протяжності залізничної мережі України відноситься до ділянок, які використовуються для швидкісного руху поїздів Intercity/Intercity+.

Важливо зважати на те, що в Україні немає спеціалізованих високошвидкісних магістралей європейського чи китайського типу (250–350

км/год). Швидкісний рух організовано на модернізованих звичайних лініях, де максимальна експлуатаційна швидкість сягає 160 км/год.

Ці показники відображають зусилля АТ «Укрзалізниця» щодо модернізації інфраструктури для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту порівняно з автомобільним та авіаційним.

Таблиця 1.1 – Частка швидкісних залізничних ліній у загальній протяжності мережі залізниць України

Показник	Значення
Загальна експлуатаційна довжина залізничної мережі України	≈ 22 100 км
Протяжність ділянок, пристосованих для швидкісного руху (до 160 км/год)	≈ 1 600 км
Частка швидкісних ділянок від загальної мережі	≈ 7,2 %
Максимальна швидкість руху поїздів Intercity+	до 160 км/год
Спеціалізовані високошвидкісні лінії (250–350 км/год)	відсутні

1.2 Сучасний стан локомотивного парку залізниць України

Локомотивний парк є ключовим активом компанії, ефективність використання якого визначається показниками експлуатації, оновлення та ремонтного циклу (рисунок 1.3). Управління з експлуатації локомотивів АТ «Укрзалізниця» є ключовим підрозділом, який забезпечує тягову потужність для вантажних та пасажирських перевезень. У його розпорядженні знаходиться парк сучасних електровозів та тепловозів, що визначає ефективність та надійність залізничної системи [8, 9].

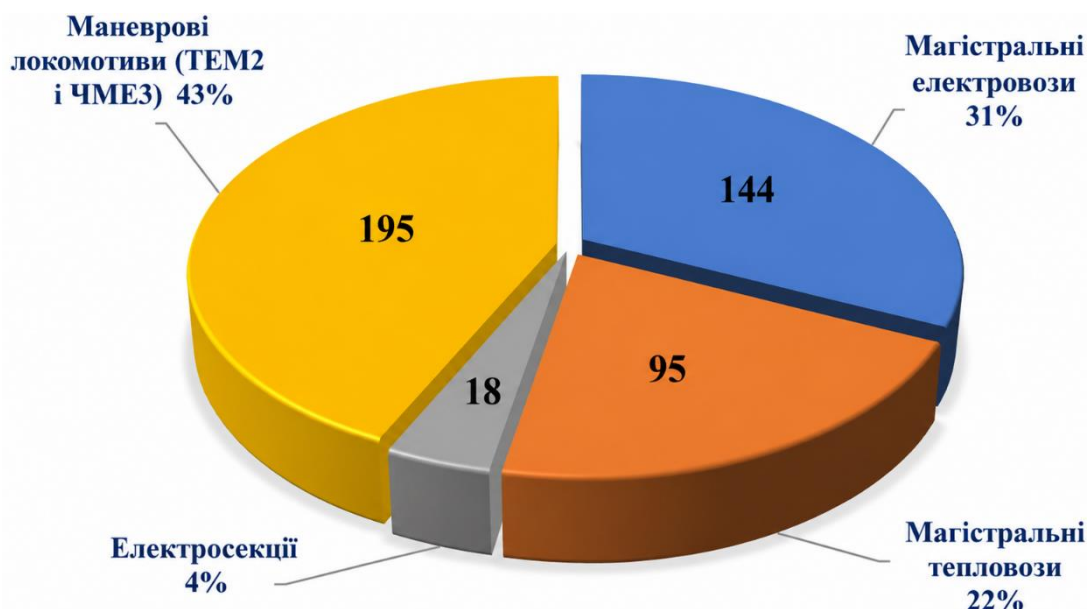


Рисунок 1.3 – Експлуатаційний парк АТ «Укрзалізниця»

Дані на кінець 2023 року відображають відсотковий розподіл різних типів рухомого складу в експлуатаційному парку. Домінуючу позицію займають маневрові локомотиви, що становлять 43% від загальної кількості. Магістральні електровози представлені 31%, магістральні тепловози – 22%, тоді як електросекції – лише 4%.

На особливу увагу заслуговує висока частка маневрових локомотивів, що свідчить про їх важливу роль у забезпеченні гнучкості та ефективності залізничних перевезень. Їх переважання наголошує на значущості маневрових операцій у загальному логістичному ланцюгу, а також на необхідності подальшого дослідження їх експлуатаційних характеристик та потенціалу для оптимізації роботи парку АТ «Укрзалізниця» (рисунок 1.4).

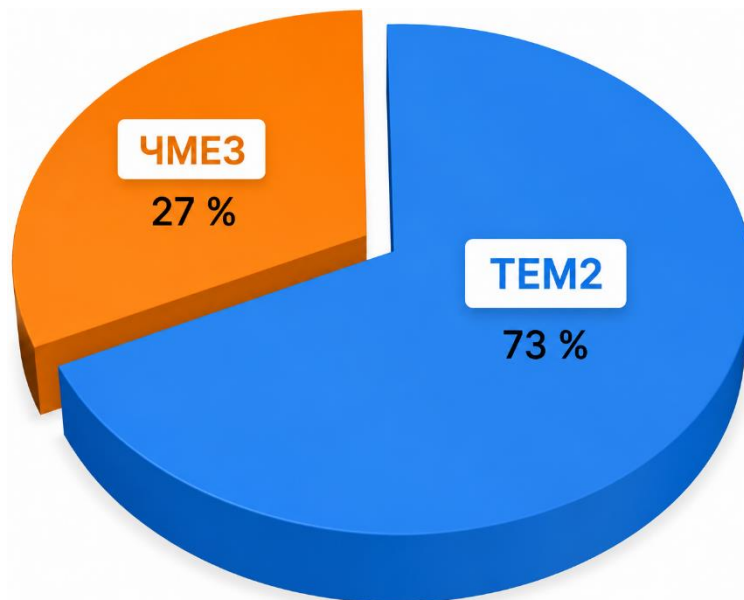


Рисунок 1.4 – Співвідношення ЧМЕЗ та ТЕМ2 в експлуатаційному парку

Домінуюче становище – 73% від загальної кількості маневрових локомотивів ТЕМ2 у парку – зумовлено їх технічними характеристиками, такими як надійність, економічність та універсальність під час виконання маневрових робіт. Це наголошує на їхній високій адаптованості та актуальності в умовах роботи в Україні.

Проте маневрові локомотиви ТЕМ2, що експлуатуються на території України, вичерпали встановлений термін служби та продовжують використовуватися понад нормативний період. Ця обставина наголошує на актуальності проведення оцінки залишкового ресурсу даних локомотивів для забезпечення їх безпечної експлуатації. Оцінка має здійснюватися у суворій відповідності до чинних норм та стандартів, включаючи технічні регламенти та рекомендації АТ «Укрзалізниця», а також з урахуванням місцевих кліматичних та операційних факторів. У зв'язку з цим результати аналізу є ключовим фактором при визначенні допустимих термінів подальшої експлуатації локомотивів, а також є основою для прийняття науково та технічно обґрунтованих рішень у рамках оновлення (модернізації чи заміни) локомотивного парку (рисунок 1.5).

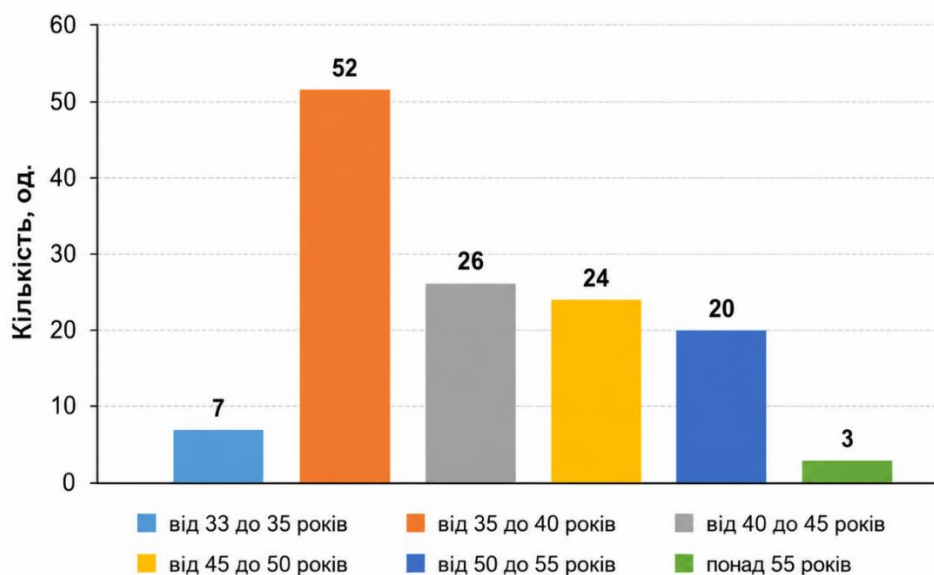


Рисунок 1.5 – Аналіз по візасту маневрових локомотивов ТЕМ2 при експлуатації локомотивного парку АТ «Укрзалізниця»

Аналіз віку маневрових локомотивів демонструє значне перевищення нормативного 32-річного терміну служби маневрових тепловозів ТЕМ2 та їх модифікацій. Віковий розподіл парку виглядає наступним чином: 5,3% складають локомотиви віком 33-35 років, 39,4% - 35-40 років, 19,7% - 40-45 років, 18,18% - 45-50 років, 15,15% - 52-55 років.

Такий аналіз виявляє критичні тенденції: 73% маневрових тепловозів серії ТЕМ2 експлуатуються понад 40 років, 47% одиниць перевищили 45-річний рубіж, а 23% перебувають в експлуатації понад 50 років. Подібна вікова структура маневрового парку тепловозів свідчить про проходження значних циклів експлуатації після капітальних ремонтів, що закономірно призводить до вичерпання ресурсу несучих конструкцій та основних вузлів. Ефект накопичення втомних ушкоджень у несучих конструкціях і ходових частинах безпосередньо корелює зі зростанням інтенсивності відмов. Це проявляється у підвищеній аварійності вузлів ходової частини та зростанні експлуатаційних витрат.

Таким чином, спостерігається прискорена деградація технічних характеристик обладнання, що при збереженні поточної тенденції вимагатиме

перегляду системи технічного обслуговування та ремонту у бік впровадження методів ремонту за фактичним станом або обґрунтування необхідності відновлення парку (рисунок 1.6).

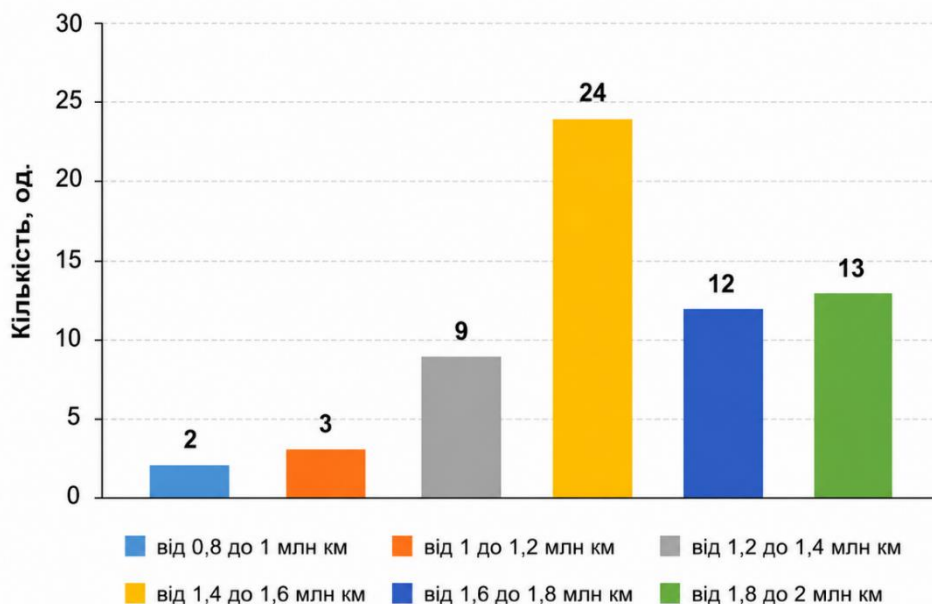


Рисунок 1.6 – Пробіг з моменту побудови маневрових тепловозів ТЕМ2

На представленій діаграмі відбито статистику розподілу маневрових тепловозів по пробігу, накопиченому з їх будівництва заводу-виробнику. Дані відносяться до депо, де експлуатується 48% (63 од. з загального парку в 132 локомотиви) маневрових локомотивів серії ТЕМ2. Згідно з нормативними документами, технічний стан конструкції маневрових локомотивів потребує обов'язкової перевірки при досягненні певного пробігу. Аналіз виявив, що 39,6% парку (25 од.) перевищили пробіг 1,6 млн км, що потребує особливої уваги згідно з нормативними документами. При цьому найбільша концентрація (38,1%) спостерігається в діапазоні 0,8–1,0 млн км, що відповідає локомотивам середнього ступеня зношування, а мінімальна кількість (3,2%) – у діапазоні 1,2–1,4 млн км – може вказувати на прогалини у плановому обслуговуванні.

Для 20,6% парку з пробігом 1,8–2,0 млн км характерні підвищене зношування ходових частин та поява втомних пошкоджень. Локомотиви з

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

пробігом 1,6-1,8 млн км (19%) також потребують посиленого контролю технічного стану.

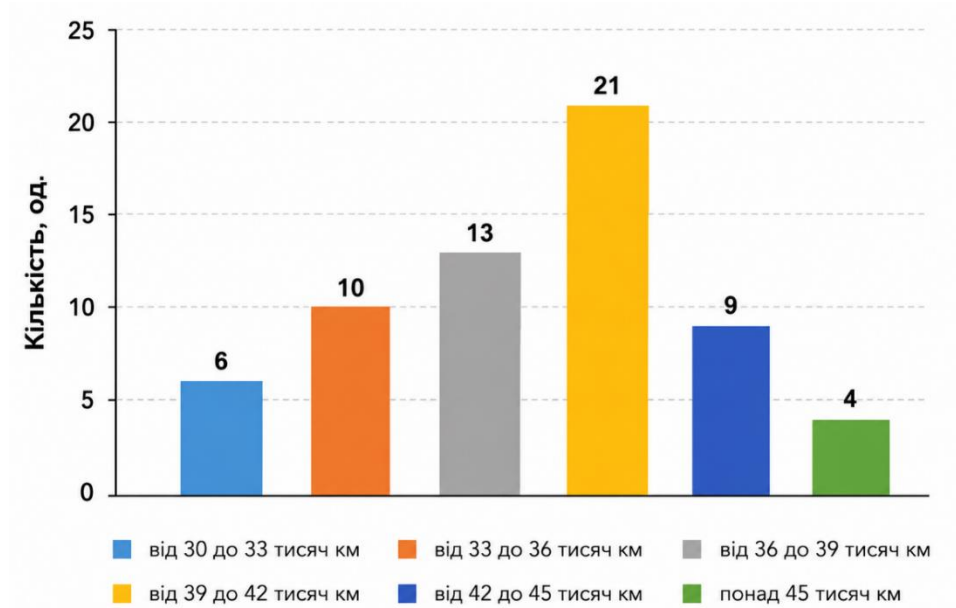


Рисунок 1.7 – Середній річний пробіг маневрових тепловозів TEM2, що експлуатуються у депо у період 2013–2023 років.

Інтенсивність маневрових робіт, які проводять маневрові тепловози TEM2, показує їхній середній річний пробіг. На рисунку 1.7 наведено середній річний пробіг маневрових локомотивів у депо Узбекистан за останні 10 років. Аналіз показує, що 6 од. маневрових тепловозів мають пробіг від 30 до 33 тис. км, 10 од. - Від 33 до 36 тис. км, 13 од. - Від 36 до 39 тис. км, 21 од. - Від 39 до 42 тис. км, 9 од. - Від 42 до 45 тис. км, 4 од. - Понад 45 тис. км.

Максимальна кількість локомотивів (21 од.) має середній пробіг від 39 до 42 тис. км, що свідчить про високу експлуатаційне навантаження. Усього 13 од. перевищують 42 тис. км, включаючи чотири з пробігом понад 45 тис. км, що потребує підвищеної уваги до їх технічного стану. Це дозволить унеможливити необґрунтовані заміни вузлів, що зберігають працездатність, і одночасно запобігти виникненню пошкоджень внаслідок вичерпання ресурсу. Крім цього, застосування даної методики дозволяє ідентифікувати граничний стан несучих елементів та ходових частин, тим самим мінімізуючи ризики

аварійності та забезпечуючи безпеку перевізного процесу при експлуатації рухомого складу понад нормативний термін.

Основні технічні характеристики тепловоза ТЕМ2 наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики тепловоза ТЕМ2

Показник	Значення
Потужність дизеля, л. с.	1200
Габарит за ДСТУ 9238:2013 «Габарити залізничного рухомого складу та наближення споруд»	1-Т
Ширина колії, мм	1520
Службова маса тепловоза, т	120 ± 3%
Осьова формула	3 _o –3 _o
Конструкційна швидкість, км/год	100
Навантаження від колісної пари на рейки, тс	20 ± 3%
Тривала сила тяги, тс	20,4 при швидкості, рівній 11,1 км/год
Тип тягової передачі	Електрична
Мінімальний радіус прохідних кривих, м	80
Габаритні розміри, мм: – ширина за виступаючими частинами – довжина за осями автозчепів – висота автозчепів від головок рейок – база повна – відстань між шкворнями	3150 16 970 1055 12 800 8600
База візка, мм	4200
Кількість ведучих осей	6
Діаметр колеса по колу катання, мм	1050
Екіпіровочні запаси, кг: – дизельного палива – піску – охолоджуючої рідини	5400 2000 1000

На рисунку 1.8 показано маневровий тепловоз ТЕМ2, який експлуатується на залізницях України понад 40 років.



Рисунок 1.8 – Маневровий тепловоз ТЕМ2

Область експлуатації маневрових тепловозів ТЕМ2 охоплює як підприємства залізничного транспорту загального користування (локомотивні депо, сортувальні станції), так і промисловий транспорт гірничо-металургійних комбінатів, де вони виконують функції технологічного транспорту, забезпечуючи вантажопотоки сировини, палива та готової продукції в умовах безперервного.

1.3 Огляд наукових праць за оцінками довговічності та ресурсу несучих конструкцій рухомого складу

Методологічну основу оцінки втомної довговічності несучих конструкцій локомотивів становлять три ключові компоненти: по-перше, принцип лінійного підсумовування пошкоджень, спочатку сформульований

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		16

Пальмгреном, по-друге, модифіковані підходи, розроблені С.В. Серенсенем та М.А. Майнером, і, по-третє, сучасні розробки В.П. Когаєва та В.В. Болотина. Еволюція теорії втомного руйнування пройшла через кілька послідовних етапів розвитку: спочатку були сформульовані базові критерії накопичення пошкоджень, потім ці методи були адаптовані для застосування в машинобудівних конструкціях, після чого до розрахунків був включений облік стохастичної природи навантаження, і нарешті, були розроблені сучасні ймовірнісні моделі оцінки. Такий поетапний прогрес у теорії дозволив створити комплексну методологію оцінки довговічності конструкцій, яка сьогодні успішно застосовується при проектуванні та експлуатації залізничного рухомого складу, забезпечуючи необхідний рівень безпеки та надійності. Проблема впливу різних чинників на опір втоми деталей глибоко досліджувалася як зарубіжними, і вітчизняними вченими, чиї роботи охоплюють три ключові напрями [5, 8, 9].

Перший напрямок характеризувався проведенням детального аналізу конструкційних особливостей, включаючи вплив геометрії деталей, наявності концентраторів напруження та технологічних факторів виробництва. У другому напрямку досліджувалися експлуатаційні дії, такі як циклічні навантаження, корозійні процеси та температурні режими роботи. Третій напрямок мав на увазі розробку комплексних критеріїв оцінки, що поєднують багаторівневі моделі руйнування, ймовірнісні методи розрахунку та інтегральні показники довговічності.

Особлива увага в цих дослідженнях приділялася вивченню взаємодії різних факторів, аналізу ефекту ушкоджень та розробці ефективних методів підвищення міцності втоми. Отримані результати не лише поглибили розуміння механізмів втомного руйнування, а й лягли в основу сучасних методик проектування та оцінки ресурсу відповідальних конструкцій, що суттєво підвищило надійність та довговічність машинобудівних виробів у різних умовах експлуатації.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовим аспектом у визначенні терміну служби локомотивів є оцінка довговічності їх тримальних конструкцій заснована на принципах механіки втомного руйнування. Експлуатаційні навантаження циклічного характеру ініціюють у матеріалі процес накопичення пошкоджень, що лімітує ресурс екіпажу. Особлива увага при цьому приділяється зварним з'єднанням, що є концентраторами напруг і визначальною ланкою міцності втоми конструкції.

Критичний вплив зварних швів на опір втоми обумовлений трьома фундаментальними факторами:

- анізотропією механічних властивостей у зоні наплавленого металу;
- структурними перетвореннями у сфері термічного впливу;
- взаємодією залишкової зварювальної напруги з експлуатаційними навантаженнями.

Комплексний облік даних факторів дозволяє суттєво підвищити достовірність прогнозування залишкового ресурсу та оптимізувати конструкторсько-технологічні рішення.

Таким чином, ресурсний аналіз несучих конструкцій рухомого складу вимагає інтеграції методів механіки руйнування, металографії та неруйнівного контролю з фокусуванням на поведінці зварних з'єднань в умовах циклічного навантаження.

Ресурс локомотива визначається ресурсом його базових елементів. Під базовими частинами в дипломній роботі розуміється сукупність головних несучих елементів конструкції, відмова яких призводить до повної втрати локомотивом експлуатаційної придатності або виникнення критичної ситуації, яка загрожує безпеці руху. Деградація механічних властивостей тримальних конструкцій відбувається переважно внаслідок втомного процесу, що розвивається в зонах конструктивних та технологічних концентраторів напруг. Таким чином, коректна оцінка залишкового ресурсу неможлива без застосування методології прогнозного втомного аналізу, що враховує спектр діючих навантажень, властивості матеріалу та історію навантаження.

Сучасні дослідження в цій галузі зосереджені на розробці методів прогнозування втомної довговічності, моделюванні поведінки матеріалів під циклічними навантаженнями та вдосконаленні конструкцій з урахуванням експлуатаційних факторів. Цей розділ узагальнює ключові напрями досліджень, включаючи експериментальні, аналітичні та чисельні підходи до вивчення втомних характеристик несучих вузлів.

Аналіз технічного стану металоконструкцій рухомого складу складає основі комплексного підходу, враховує як абсолютні значення критичних параметрів, і динаміку їх зміни у процесі експлуатації. Слід зазначити, що кількість фундаментальних досліджень у галузі оцінки міцності реальних конструкцій тепловозів залишається обмеженою.

Сучасні дослідження демонструють необхідність урахування явища малоциклової втоми щодо залишкового ресурсу високонавантажених елементів. Методика оцінки передбачає всебічне вивчення напружено деформованого стану конструкцій під впливом повного спектра експлуатаційних навантажень. Особлива увага приділяється визначенню граничних станів за такими критеріями: допустима напруга, критичні деформації, геометричні параметри відповідно до ремонтних норм, а також допустимі величини відносних переміщень конструктивних елементів.

Застосування цього підходу потребує розробки спеціалізованих методик, що поєднують сучасні засоби комп'ютерного моделювання з результатами випробувань натур і даними експлуатаційного моніторингу. Важливим напрямом є створення уніфікованих алгоритмів оцінки, що дозволяють достовірно прогнозувати залишковий ресурс несучих конструкцій у різних умовах експлуатації.

Передові дослідження у галузі підвищення надійності та експлуатаційної безпеки залізничного рухомого складу здійснюються провідними науковими центрами, які розробляють інноваційні рішення, спрямовані на:

– на оптимізацію конструктивних рішень;

					РДБ.ЗТ-22д.02 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

- підвищення ресурсу критичних вузлів;
- впровадження нових матеріалів та технологій;
- вдосконалення методів діагностики.

Реалізація цих завдань виконується у тісній взаємодії з промисловими підприємствами, що забезпечує практичну спрямованість досліджень та їхнє швидке впровадження у виробництво. Комплексний підхід до виконання робіт враховує актуальні експлуатаційні вимоги та перспективи розвитку залізничного транспорту, включаючи цифровізацію та впровадження інноваційних технологій.

При цьому ключова увага приділяється створенню рішень, які не тільки підвищують надійність рухомого складу, але забезпечують економічну ефективність його експлуатації. Все це робить дослідження важливим елементом у процесі модернізації залізничної галузі та підвищення її конкурентоспроможності на міжнародному рівні.

Фундаментальні дослідження у галузі розрахункових методів оцінки міцності рамних конструкцій проводилися колективами провідних наукових шкіл, де було досягнуто значних результатів. Зокрема, фахівці розробили інженерні методики оптимізації конструкцій, які включають визначення оптимальних геометричних параметрів поперечних перерізів, розрахунок статично невизначених систем під час кручення, а також аналіз напруженого стану візків [13–14].

Паралельно велися дослідження, спрямовані на розробку методів обліку змінних навантажень, алгоритмів оцінки циклічної довговічності та підходів до розрахунку складових конструкцій. Ці роботи дозволили суттєво поглибити розуміння поведінки матеріалів та вузлів рухомого складу в умовах реальної експлуатації [5, 6].

У всіх перелічених дослідженнях особлива увага приділялася переходу від емпіричних до суворих розрахункових методів, обліку реальних умов експлуатації, розроблення уніфікованих алгоритмів та створення практичних методик для інженерних розрахунків.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці напрацювання лягли в основу сучасних підходів до проектування та оцінки надійності залізничного рухомого складу, а також сприяли впровадженню комп'ютерного моделювання та цифрового прототипування в інженерну практику.

Розроблені методики базуються на кількох фундаментальних принципах: по-перше, вони враховують нелінійний характер деформування матеріалу, по-друге, аналізують складні процеси перерозподілу напруги, по-третє, визначають критичні рівні деформації і, нарешті, оцінюють енергетичні параметри руйнування. Особливе значення у цих дослідженнях приділяється роботам, присвяченим встановленню граничних станів щодо різних типів навантаження, розробці універсальних критеріїв руйнації, створенню практичних методів розрахунку, і навіть експериментальному підтвердженню теоретичних моделей.

Такий комплексний підхід дозволяє не тільки більш точно прогнозувати поведінку матеріалів та конструкцій, а й суттєво підвищує надійність розрахунків під час проектування відповідальних вузлів, що працюють в умовах пластичного деформування. При цьому особлива увага приділяється практичному застосуванню теоретичних розробок, що робить ці методики потрібними в інженерній практиці.

У дослідженнях О.М. Савоськіна та Є.В. Сердобинцева розроблено фундаментальні залежності для прогнозування напрацювання вцент елементів залізничного рухомого складу, засновані на математичному апараті теорії випадкових процесів. Ця методологія включає три ключові положення: по-перше, моделювання викидів параметрів за допустимі межі, по-друге, ймовірнісний аналіз навантаження в залежності від швидкості руху і, по-третє, інтегральну оцінку пошкоджень.

Отримані аналітичні вирази встановлюють кількісний зв'язок між декількома важливими факторами: швидкісними характеристиками екіпажу, динамікою навантаження конструктивних елементів, процесом накопичення втомних ушкоджень та прогнозованим ресурсом деталей.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю даного підходу є комплексний облік різних параметрів, включаючи стохастичну природу експлуатаційних навантажень, нелінійну залежність навантаження від швидкості руху, і навіть індивідуальні характеристики конкретних маршрутів.

1.4 Дослідження стану найбільш ушкоджуваних зон несучих конструкцій маневрових локомотивів в експлуатації

Накопичення втомних пошкоджень в несучих системах під циклічними навантаженнями є домінуючою причиною деградації експлуатаційних характеристик і становить суттєвий ризик безпеки.

Визначимо основні чинники цієї проблеми: по-перше, прогресуючий характер втомного руйнування, що розвивається поступово; по-друге, кумулятивний ефект циклічних навантажень, що призводить до накопичення мікроскопічних ушкоджень; по-третє, критичне вплив цих процесів на загальну безпеку експлуатації. Все це обумовлює гостру необхідність розробки ефективних превентивних заходів діагностики та методів раннього виявлення ушкоджень.

Особливу складність при аналізі та оцінці стану становити саме зварні сполуки, де є цілий комплекс проблемних факторів: технологічно обумовлені концентратори напруг, зміни мікроструктури матеріалу внаслідок термічного впливу при зварюванні, а також ймовірність наявності прихованих дефектів зварних швів, які можуть стати осередками розвитку втомних тріщин. Внаслідок цього комплексне вплив даних факторів істотно ускладнює оцінку залишкового ресурсу зварних конструкцій, вимагаючи застосування спеціалізованих методів неруйнівного контролю та діагностики, таких як ультразвукова дефектоскопія, радіографічний контроль та методи акустичної емісії, які дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях їх формування та попередження.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

При оцінці ресурсу зварних несучих конструкцій існуючі моделі багатоциклової втоми не враховують залишкових зварювальних напруг, що знижує адекватність прогнозування для циклічно навантажених конструкцій, які, у свою чергу, значно знижують втомну довговічність при багатоцикловому навантаженні.

Таким чином, до методологічних проблем можна віднести:

- необхідність урахування нестационарного характеру експлуатаційних навантажень;
- наявність істотного впливу залишкових напруг на процес зародження тріщин;
- складна взаємодія робочих та технологічних напруг;
- модифікацію механічних властивостей матеріалу у зоні зварного шва.

Для вирішення цих проблем розробляються перспективні напрямки вдосконалення розрахункових методів: створення спеціальних коригувальних коефіцієнтів, що враховують залишкові напруження; розробка комбінованих моделей, що інтегрують технологічні фактори; використання ймовірнісних підходів до оцінки ресурсу; а також використання результатів контролю, що не руйнує, для уточнення розрахункових прогнозів. Комплексне застосування цих підходів дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу зварних конструкцій, що є особливо важливим для забезпечення безпечної експлуатації відповідальних вузлів залізничного рухомого складу.

Утворення втомних тріщин у несучих конструкціях тепловозів переважно обумовлено динамічними напругами, що виникають у процесі експлуатації, що робить необхідним створення точних динамічних моделей, здатних достовірно відтворювати реальні умови навантаження з урахуванням усіх ключових параметрів. Однак проведення експериментальних досліджень втомної довговічності стикається з істотними труднощами, пов'язаними, по-перше, з великими габаритами конструктивних елементів, по-друге, зі

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

значною масою зразків, що випробувані, і, по-третє, з високою вартістю стендових випробувань.

У зв'язку з цими обмеженнями особливої значущості набувають альтернативні методи оцінки, що включають розробку точних розрахункових методик, створення верифікованих комп'ютерних моделей, застосування сучасних методів математичного моделювання та використання даних експлуатаційного моніторингу. Важливість коректної оцінки втомної довговічності важко переоцінити, оскільки вона безпосередньо впливає на три ключові аспекти: ресурсні характеристики, ремонтні цикли та безпеку експлуатації, які визначають надійність та економічну ефективність залізничного транспорту.

Тримаючі металоконструкції залізничного рухомого складу виготовляються з маловуглецевих і низьколегованих сталей з використанням дугового зварювання електродом, що плавиться. Залежно від функціонального призначення вони виконуються в рамному (візкові, головні рами), ферменному (тримаючі елементи кузовів), пластинчастому або оболонковому виконанні [7].

Виробничий цикл включає три етапи контролю: проектування за галузевими нормативами, виготовлення за технічними документами та приймання зварних з'єднань (рисунок 1.9, а-в). Незважаючи на застосування різних методів неруйнівного контролю, до 30% швів експлуатуються з неприпустимими дефектами, що вимагають класифікації з локалізації, геометрії та потенціалу розвитку [1, 4, 5].

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.9 – Рами візків маневрового тепловоза з ушкодженнями втомного характеру та корозійного зносу (а, б, в)

Аналіз експлуатаційних даних, наданих ремонтними заводами та обслуговуючими депо, виявив, що у маневрових тепловозів серії ТЕМ2 у процесі тривалої експлуатації виникають значні деформації консольних

частин головних рам, причому величина прогину часто перевищує встановлені Правилами ремонту допустимі значення в 15 мм. Поряд із цим у найбільш навантажених вузлах конструкції, таких як шкворневі з'єднання та шкворневі балки, регулярно фіксуються залишкові деформації, а в критичних зонах спостерігається утворення тріщин, що свідчить про серйозні втомні процеси в матеріалі (рисунки 1.10–1.11). Обстеження рами візка маневрового тепловоза показало наявність корозії елементів та втомних дефектів у зонах зварних швів (у зонах сполучення поперечних та шкворневих балок з боковинами, буксових щелеп з боковинами). Крім того, спостерігаються вигини поздовжніх балок у вертикальній площині: стріла прогину в кінцевих частинах становить від 3 до 7 мм [9].



Рисунок 1.10 – Тріщини у шкворневому вузлі на головній рамі маневрового тепловоза ТЕМ2

Основними причинами виникнення таких представлених пошкоджень можна вважати інтенсивний циклічний вплив експлуатаційних навантажень, локальну концентрацію напруг у вузлових з'єднаннях, прогресуючі втомні процеси в матеріалі конструкції і, нарешті, ефект багаторічної експлуатації, що призводить до поступового накопичення мікроушкоджень.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.11 – Тріщини, що виникли у зварному шві головної рами маневрового тепловоза ТЕМ2

Комплексна дія цих факторів обумовлює необхідність розробки спеціальних методик діагностики, ремонту та посилення конструкцій, а також перегляду нормативів за міжремонтними термінами для даної техніки.

1.5 Оцінка механічних властивостей матеріалу несучої конструкції маневрового локомотива після закінчення терміну служби

У сучасній транспортній галузі особлива увага приділяється забезпеченню надійності та безпеки експлуатації залізничного рухомого складу, у тому числі маневрових локомотивів [11]. Одним із ключових аспектів забезпечення довговічності та безпеки експлуатації залізничного транспорту є оцінка несучої здатності базових частин рухомого складу [50, 88]. Оцінка достовірності результатів обумовлена знанням механічних характеристик матеріалів, що застосовуються у несучих конструкціях. Ці властивості можуть значно змінюватися під впливом тривалого впливу навантажень, вібрацій та агресивного середовища, що особливо актуально для рухомого складу, що експлуатується в умовах інтенсивного використання, зокрема маневрових локомотивів.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість служби маневрових локомотивів, як і будь-якої складної технічної системи, обмежена безліччю факторів, серед яких – міцність втоми матеріалів їх несучих конструкцій. Існують підходи щодо визначення ресурсу локомотивів з позиції опору втоми їх несучих конструкцій [3, 4, 7].

Особливо великий інтерес представляє завдання щодо оцінки залишкового ресурсу локомотива поза його призначеного терміну служби. Одним із завдань при оцінках залишкового ресурсу локомотива після закінчення призначеного терміну служби є необхідність вивчення фізико-механічних характеристик матеріалу їх несучих конструкцій, щоб ухвалити обґрунтоване рішення щодо можливості подальшої експлуатації або необхідності списання. Оцінимо зміни характеристик міцності матеріалу рами візка після його тривалого використання для подальшого обґрунтування залишкового ресурсу на підставі отриманих даних.

Як було зазначено раніше, одними з вузлів, що визначає залишковий ресурс локомотива, є його базові частини, до яких належать його несучі конструкції: головна рама та рами візків [3, 4]. У дослідженні як об'єкт дослідження було обрано раму візка маневрового тепловоза ТЕМ2, що експлуатується на залізницях Узбекистану. Цей локомотив було введено в експлуатацію понад 40 років тому, і на момент дослідження перевищив призначений термін служби. Як досліджуваний матеріал був відібраний зразок сталі з найбільш навантаженої частини рами візка, що зазнав максимальної експлуатаційної дії (рисунок 1.12).

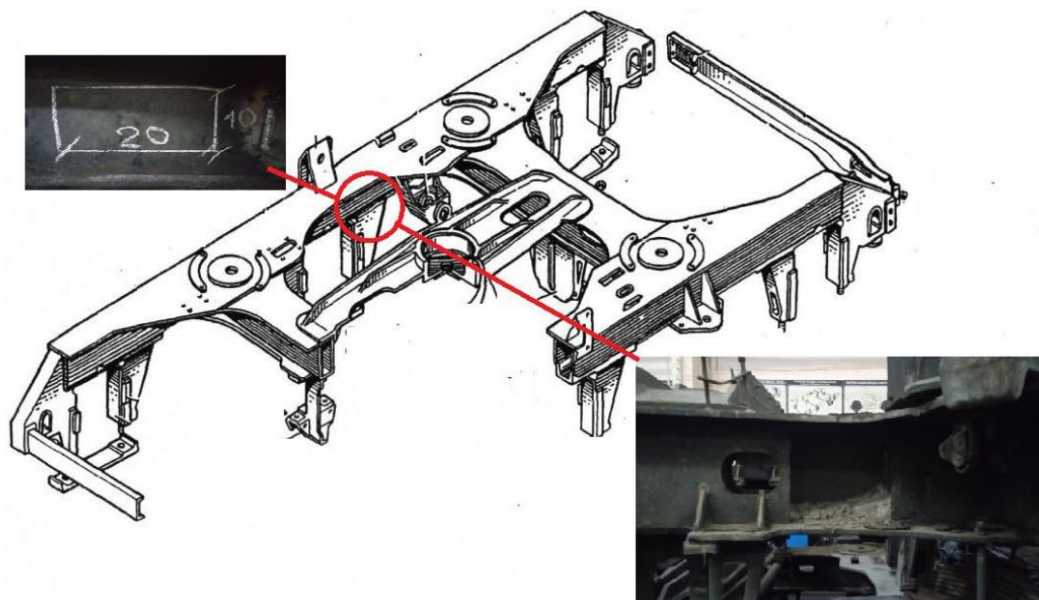


Рисунок 1.12 – Місце вилучення матеріалу для підготовки зразка при подальших випробуваннях

Рама візка тепловоза ТЕМ2 виготовлена зі сталі марки Ст3кп (кипляча) [8, 9], яка використовується в промисловості для елементів зварних та не зварних конструкцій та деталей, що працюють при температурі від -40 до 400°C , зокрема, для виготовлення елементів екіпажних частин локомотивів. Відповідно до ГОСТ 380-94 «Сталь вуглецева звичайної якості. Марки», до хімічного складу сталі марки висуваються певні вимоги (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Масова частка, %, хімічних елементів у сталі Ст3кп

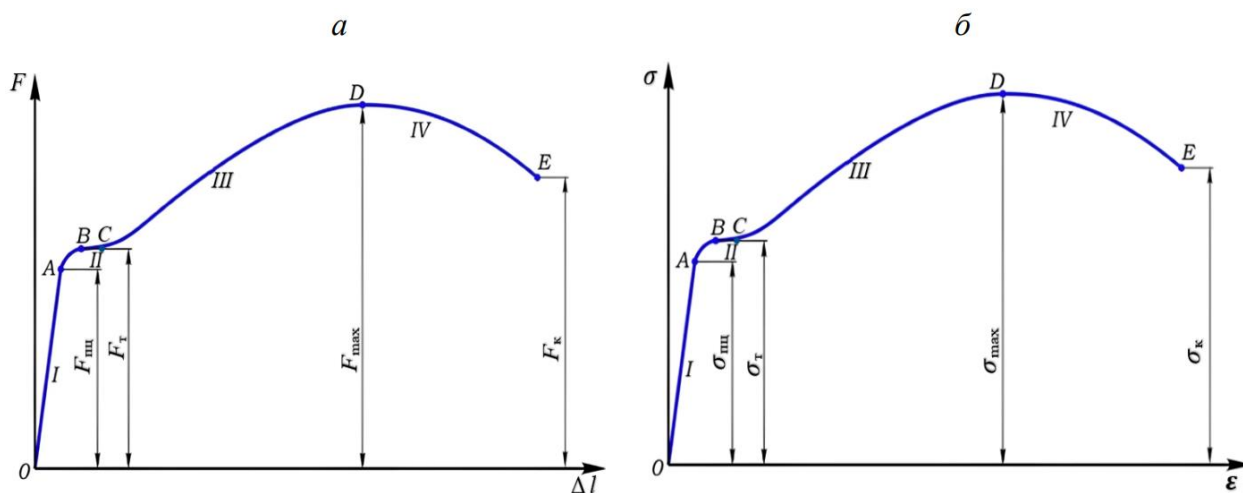
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	As
0,14–0,22	0,4–0,65	$\leq 0,05$	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	$\leq 0,08$

У ГОСТ 535–2005 «Прокат сортовий та фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови наведені дані, що характеризують механічні властивості Ст3кп (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 - Механічні властивості сталі Ст3кп

Межа плинності σ_t , МПа	Тимчасовий опір σ_b , МПа	Відносне подовження δ , %
195–235	360–460	24–27

Наведемо коротку теоретичну довідку. Основною метою випробувань на розтягування є отримання діаграми розтягувань, що встановлює зв'язок між силою, що розтягує і деформаціями, що викликаються нею. Діаграма є графік (рисунок 1.13), який наочно показує, як поводить матеріал зразка в процесі навантаження [10, 12].



а – на розтягування; б – напруги

Рисунок 1.13 – Приклад діаграм зразків із сталі

Отриману діаграму можна розбити на низку характерних областей. На початковому етапі навантаження, на ділянці ОА, матеріал слідує закону Гука. Далі слідує характерна ділянка ВС, яка називається майданчиком плинності. Ця ділянка характеризується тим, що деформація зростає за постійного навантаження. Наступна область – CD, яка називається зоною зміцнення, вимагає для деформації зразка додатку зростаючого навантаження. У момент досягнення точки D на зразку локалізується найслабше місце, і надалі на цьому місці утворюється місцеве звуження, зване шийкою. Остання ділянка з моменту утворення шийки DE – це ділянка місцевої плинності, де переріз зразка зменшується, і, певний момент, зразок розривається.

Нижче введено позначення: $F_{\text{пл}}$ – сила пропорційності; $F_{\text{т}}$ – сила плинності; F_{max} – максимальна сила, яку зразок витримує до руйнування; $F_{\text{к}}$ – навантаження, що безпосередньо передую моменту руйнування.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки цим силам можна описати характеристики міцності матеріалу, до яких відносяться межа пропорційності, межа плинності та межа міцності.

Межа пропорційності матеріалу $\sigma_{\text{пц}}$ – напруга, до досягнення якої у матеріалі не виникають залишкові деформації. Він визначається як відношення сили $F_{\text{пц}}$ до початкової площі поперечного перерізу зразка S :

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{S},$$

Межа плинності $\sigma_{\text{т}}$ – відношення навантаження, що відповідає майданчику плинності $F_{\text{т}}$, до первісної площі поперечного перерізу зразка S . Межу плинності також називають напругою, при досягненні якої деформації збільшуються при постійному навантаженні:

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{S},$$

Остання характеристика – межа міцності $\sigma_{\text{в}}$ – перебуває як відношення максимальної сили F_{max} до початкової площі поперечного перерізу зразка S :

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{F_{\text{max}}}{S},$$

Наступною механічною властивістю металу є ударна в'язкість, яка залежить від складу, елементів, що легують, і помітно змінюється при зміні температури. Фізично ударна в'язкість позначається як KCU та вимірюється в джоулях на квадратний сантиметр, тобто. Дж/см². Математичний розрахунок здійснюється за формулою:

$$KCU = \frac{A}{S}.$$

де A – робота, витрачена на ударний злам зразка;

S – площа поперечного перерізу зразка у надрізі.

Ще однією механічною властивістю сталевих матеріалів є його твердість, яка характеризує здатність одного, твердішого тіла, проникати в інше. Ця характеристика визначає стійкість деталі до пластичної деформації або руйнування її поверхневих шарів при наданні сильного тиску. Вимірювання твердості дослідного зразка (рис. 1.14) проводиться класичним методом Брінеллю відповідно до ГОСТ 9012-59 «Метали. Метод виміру твердості за Брінеллем».

У процесі випробування зразка спеціальна кулька (зі сталі або твердого сплаву) шляхом вичавлювання впливає на дослідний зразок. Зусилля має бути прикладене перпендикулярно до поверхні дослідного зразка. Після встановленого часу дії такого зусилля згідно з ГОСТ 9012-59 вимірюється діаметр відбитка на зразку. Відбиток, що залишився, вимірюється за шкалою твердості, зазначеною в ГОСТ 9012-59. Значення твердості визначається за Брінеллем як HV , де H - hardness (твердість); V - Brinell (Брінелль). Значення твердості по Брінеллю HV математично описується як відношення навантаження P , кгс, площі поверхні відбитка d , мм².

					<i>РДБ.3Т-220.02 ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

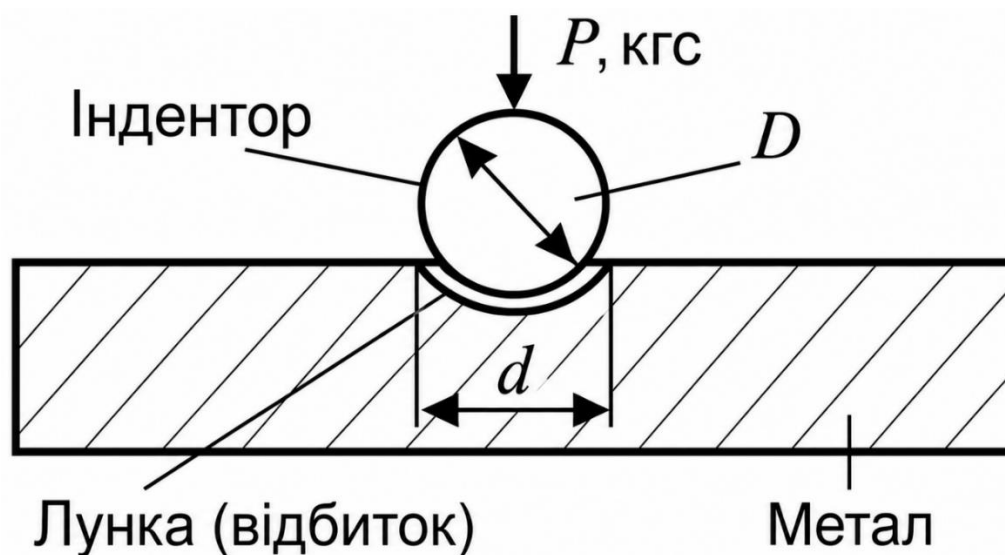
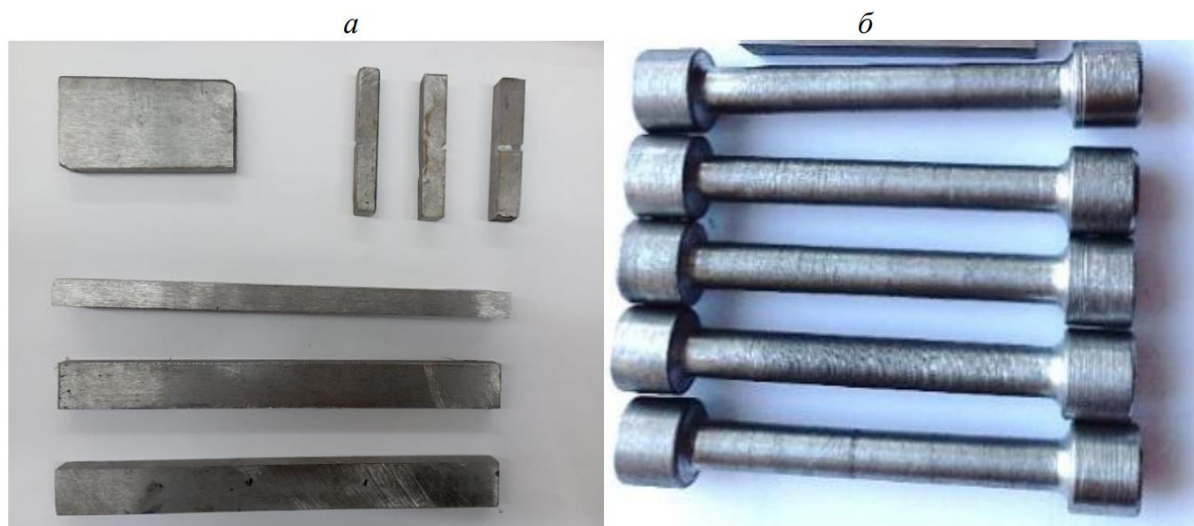


Рисунок 1.14 – Схема докладання зусилля та вимірювання твердості

Випробування на розтягування проведено відповідно до ГОСТ 1497-84 «Метали. Методи випробувань на розтяг». Були зроблені зразки другого типу. Для випробувань на розтяг, а також зразки для випробувань на ударну в'язкість (рисунок 1.15). Зазначимо, що ГОСТ 1497-84 регламентує методи статичних випробувань на розтяг для чорних і кольорових металів, а також виробів з них з номінальним діаметром або найменшим розміром у поперечному перерізі 3,0 мм і більше.



а – на ударну в'язкість; б – на розтягування

Рисунок 1.15 – Дослідні зразки для випробувань

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

33

Випробування на розтягування (рисунок 1.16) проводилися на розривній машині згідно з ГОСТ 28840-90 «Машини для випробування матеріалів на розтягування, стиснення та вигин. Загальні технічні вимоги»; випробування на ударну в'язкість – на маятниковому копрі відповідно до ГОСТ 10708–82 «Копри маятникові. Технічні умови».



Рисунок 1.16 – Універсальна випробувальна машина

В результаті проведених випробувань отримано дані, подані в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати механічних випробувань зразків

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Межа текучості, σ_T	235	МПа
Тимчасовий опір розриву, σ_B	395	МПа
Модуль пружності, E	213	ГПа
Коефіцієнт Пуассона, μ	0,286	–
Модуль зсуву, G	82,8	ГПа
Твердість за Брінеллем, HB	111	МПа
Ударна в'язкість, KCU	145,3	Дж/см ²
Відносне видовження, δ	40,7	%

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

34

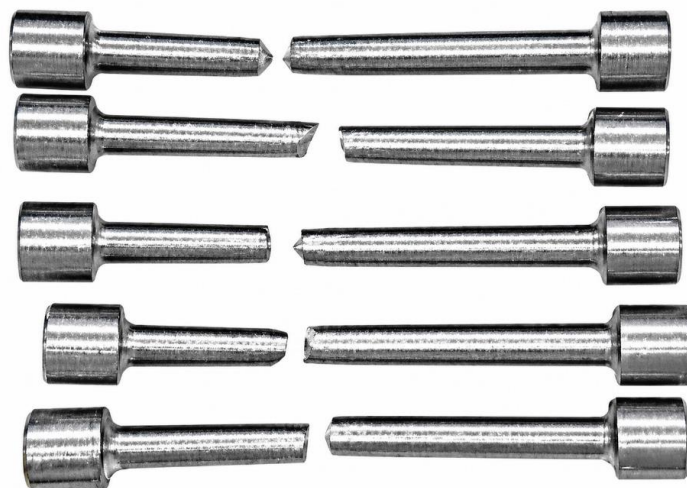


Рисунок 1.17 – Досвідчені зразки після випробувань

На основі проведених досліджень та випробувань зразка сталі (рисунок 1.17) із рами візка маневрового тепловоза ТЕМ2 було встановлено, що механічні властивості досліджуваного матеріалу відповідають вимогам ГОСТ 535–2005. Це підтверджує, що навіть після тривалої експлуатації та перевищення офіційно встановленого терміну служби, матеріал зберігає свої характеристики міцності, що важливо для забезпечення безпеки залізничних перевезень.

Виконано аналіз із використанням стаціонарного оптико-емісійного спектрометра ДФС-500, призначеного для визначення хімічного складу чорних та кольорових металів, включаючи легуючі елементи, вуглець, сірку, фосфор та інші домішки. Апарат характеризується компактністю, високою надійністю та відповідає стандартам металургійної, ливарної та машинобудівної галузей.

Для повнішої та всебічної оцінки механічних властивостей матеріалу, особливо з погляду його втомної міцності, необхідно проведення додаткових, більш дорогих і трудомістких випробувань на опір втоми. Ці випробування дозволять визначити залишковий ресурс матеріалу з більшою точністю та виявити можливі мікроструктурні зміни, які можуть вплинути на довговічність та надійність конструкцій в умовах реальної експлуатації.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Як було сказано вище, випробування з визначення залишкових напруг відносяться до найбільш складних і дорогих, проте, сучасна методологія [7] має у своєму розпорядженні підходи, що дозволяють виконувати їх оцінку ультразвуковими методами. Застосування такого методу дозволяє визначити наявність залишкових напруг, які індукують мікроструктурні зміни, зокрема формування кристалографічної текстури. Макроскопічним наслідком є зміна акустичних характеристик матеріалу. Ультразвукові методи, засновані на вирішенні зворотної задачі акустопружності, використовують цю залежність для реконструкції поля напруг за виміряними швидкостями поширення ультразвуку.

Діяльність пропонується метод акустопружності (лазерно-ультразвукової структуроскопії) визначення модуля пружності матеріалу несучої конструкції [11, 12]. При вимірі застосовано широкосмуговий лазерно-ультразвуковий перетворювач ПЛУ-6П-02 (рисунок 1.18).

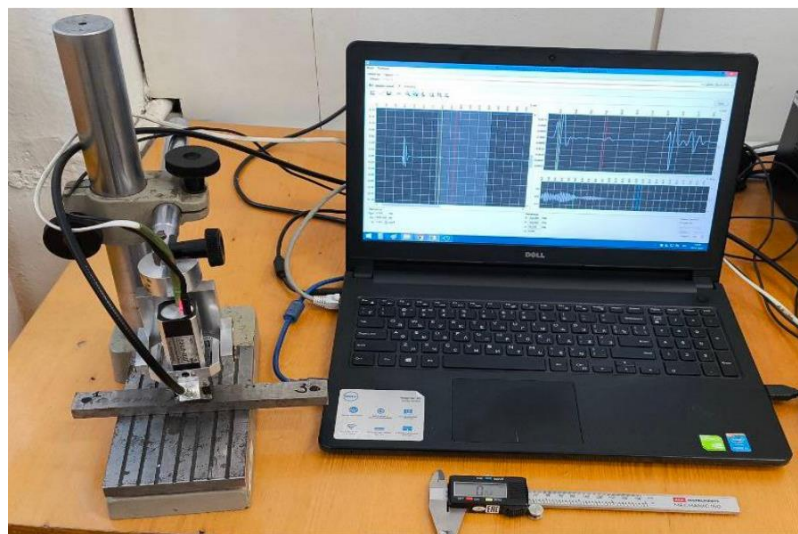


Рисунок 1.18 – Прибор для определения механических свойств методом лазерно-ультразвуковой структуроскопии

Метод лазерно-ультразвукової структуроскопії є передовий підхід до неруйнівного методу визначення модуля пружності. Його фізичний принцип заснований на точному вимірі швидкості поширення ультразвукових хвиль, що генеруються імпульсним лазерним впливом, з подальшим розрахунком

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		36

модуля пружності через фізичні співвідношення (рисунок 1.19). Ключовими перевагами методики є висока просторова роздільна здатність, можливість дистанційних вимірів та проведення досліджень у режимі реального часу. Разом з тим, необхідно підкреслити, що даний метод визначення модуля пружності є дорогим, що обумовлено складністю лазерного та вимірювального обладнання, що використовується. Напруги визначаються через вимірювання анізотропії швидкості пружних хвиль, зумовленої акустопружним ефектом. Для хвилі, поляризованої вздовж напрямку головної напруги, ефект подвійного променезаломлення відсутній; оцінка проводиться у різниці швидкостей до і після навантаження.

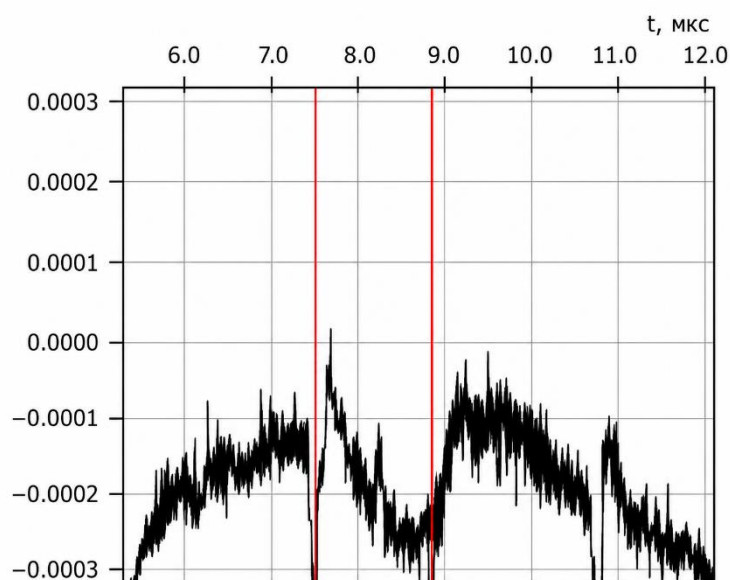


Рисунок 1.19 – Результати визначення механічних властивостей методом лазерно-ультразвукової структуроскопії

Акустопружний ефект є наслідком нелінійності пружних властивостей матеріалу. Його слабка вираженість у твердих тілах потребує прецизійного (0,01–0,10%) вимірювання швидкості ультразвуку для досягнення похибки у визначенні напруги на рівні 10%.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РАМИ ВІЗКА МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

2.1 Аналіз методів математичного моделювання механіки твердого тіла, яке деформується

Сучасний етап розвитку залізничного транспорту характеризується безпрецедентним посиленням вимог до безпеки, надійності, пропускної спроможності та економічної ефективності. В умовах зростаючих швидкостей, осьових навантажень та інтенсивності руху класичні методи інженерного розрахунку, що базуються на аналітичних рішеннях для несучих конструкцій, стають недостатніми. Складність геометрії вузлів, нелінійність фізико-механічних процесів, багатофакторність зовнішніх впливів та необхідність оцінки ресурсу диктують перехід на новий інструментарій. Таким інструментом, що довело свою універсальність і міць, є комп'ютерне моделювання в механіці твердого тіла, що деформується (МДТТ).

Аналіз динамічної навантаженості є важливим етапом проектування сучасних несучих конструкцій, що працюють в умовах нестаціонарних силових впливів. Сучасний науковий підхід до вирішення цього завдання базується на застосуванні методів комп'ютерного моделювання, що дозволяють з достатньою для інженерної практики точністю прогнозувати ресурс конструкції без проведення дорогих натурних експериментів.

Аналіз динамічної навантаженості є важливим етапом проектування сучасних несучих конструкцій, що працюють в умовах нестаціонарних силових впливів. Сучасний науковий підхід до вирішення цього завдання базується на застосуванні методів комп'ютерного моделювання, що дозволяють з достатньою для інженерної практики точністю прогнозувати ресурс конструкції без проведення дорогих натурних експериментів.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою оптимізації процесу при вирішенні завдань, пов'язаних із забезпеченням ресурсу та міцності рухомого складу, застосовуються методи чисельного моделювання. Зокрема, методи чисельного моделювання широко впроваджено у системи автоматизованого проектування. З огляду на широкий спектр завдань, що вирішуються інженерами, та підходів для реалізації їх вирішення існує велика кількість програмних засобів. Багато з них реалізують у своїх алгоритмах методи, що добре зарекомендували себе [12].

Далі розглянуто основні методи чисельного моделювання.

Метод кінцевих елементів (МКЕ). У інженерів та дослідників цей метод залишається основним інструментом чисельного аналізу, що поєднує універсальність із низкою важливих обмежень [12, 15, 16]. Сучасні комерційні пакети (SolidWorks, Ansys, Nastran, Abaqus та ін) надають можливості для нелінійного динамічного аналізу, що враховує геометричну нелінійність (великі переміщення), фізичну нелінійність (пластичність, повзучість), а також складні контактні взаємодії у вузлах [9]. До ключових переваг методу кінцевих елементів належать здатність моделювання складних геометрій, облік різномірних властивостей матеріалів та широке охоплення фізичних завдань – від механіки деформованого твердого тіла до теплопередачі, акустики та багатодисциплінарних розрахунків. Інтеграція з CAD/CAE-системами та детальність одержуваних полів напруг та деформацій роблять МКЕ основою сучасного інженерного проектування.

Проте застосуванню МКЕ притаманні суттєві проблеми. Критичним фактором є якість дискретизації: чутливість до геометрії сітки, необхідність адаптивного згущення в зонах концентрації напруги та вимога до «чистоти» вихідної геометрії. Висока обчислювальна вартість обмежує аналіз складних тривимірних моделей, особливо за нелінійних постановок. Надійність результатів вимагає суворої верифікації (перевірки збіжності рішення під час згущення сітки) та валідації (порівняння з експериментальними даними). Ризики використання МКЕ посилюються ефектом «чорної скриньки» – можливістю отримання некоректних результатів при недостатньому розумінні

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

фізики процесів та чисельних методів, а також складністю інтерпретації даних, коли необхідно відрізняти фізичні ефекти від чисельних об'єктів.

Області застосування МКЕ охоплюють розрахунки на міцність і жорсткість, аналіз стійкості, модальний і динамічний аналіз, завдання теплопередачі, термопружності, механіки рідини (включаючи задачі Fluid-Structure Interaction), а також спеціалізовані напрямки – електромагнетизм, акустику і біомеханіку. Таким чином, ефективність МКЕ визначається тріадою компетенцій: глибоким розумінням фізики явищ, знанням основ чисельних методів та неухильним дотриманням процедур верифікації та валідації [6, 9].

Метод кінцевих різниць (МКР). Метод кінцевих різниць порівнює МКЕ. Він відноситься до основного інструменту для вирішення крайових завдань математичної фізики, що описують процеси тепломасоперенесення, фільтрації та деформування [15]. Сучасні обчислювальні платформи (OpenFOAM, Ansys Fluent, COMSOL та інших.) реалізують конечно-разностные схеми на вирішення нестационарних багатовимірних завдань, враховують нелінійність визначальних співвідношень, рухливі межі розділу середовищ і пов'язані фізичні явища [15].

Метод кінцевих різниць є обчислювальний підхід, заснований на безпосередній апроксимації похідних у диференціальних рівняннях за допомогою різницевого відношення. На відміну від методу кінцевих елементів, що оперує інтегральними формулюваннями та апроксимацією полів усередині елементів, МКР працює безпосередньо з диференціальною формою рівнянь математичної фізики.

Ключовою перевагою МКР є концептуальна прозорість та ефективна реалізація для завдань у регулярних галузях із простою геометрією. Метод демонструє високу точність при використанні схем високого порядку і особливо ефективний для нестационарних завдань, де забезпечує природну дискретизацію за часом. Проте важливим обмеженням МКР залишається складність роботи із складними геометриями, оскільки побудова різницевої мережі, адекватно описують криволінійні кордону, становить значні труднощі.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатковими недоліками є проблеми з урахуванням природних граничних умов та схильність до виникнення чисельних осциляцій у зонах різких градієнтів розв'язання.

Область ефективного застосування МКР охоплює обчислювальну гідродинаміку, вирішення рівнянь у приватних похідних у канонічних областях, а також завдання математичної фізики з домінуючими похідними за часом. Таким чином, МКР зберігає значення як потужний інструмент для спеціалізованих класів завдань, де його алгоритмічна простота та обчислювальна ефективність перевершують можливості МКЕ, але поступається останньому в універсальності для аналізу складних інженерних систем довільної геометрії [13].

Метод граничних інтегральних рівнянь (МДІУ). Цей метод зберігає статус ефективного математичного апарату на вирішення крайових завдань теорії пружності і механіки руйнації [14]. Сучасні спеціалізовані обчислювальні комплекси (BEAST, BEM++, FastBEM) реалізують алгоритми МДІУ для аналізу сингулярних полів напруг, що враховують анізотропію властивостей матеріалів, багатозв'язок областей та тріщини довільної конфігурації [16].

Метод граничних інтегральних рівнянь є обчислювальний підхід, заснований на перетворенні вихідних диференціальних рівнянь у приватних похідних до інтегральних рівнянь, заданих виключно на межі розрахункової області. На відміну від методів кінцевих елементів (МКЕ) та кінцевих різниць (МКР), що вимагають дискретизації всього обсягу, МДІУ зводить завдання до визначення невідомих лише на граничній поверхні, що принципово знижує розмірність завдання.

Ключовою перевагою МДІУ є автоматичне задоволення фундаментальних рішень, що забезпечує високу точність при моделюванні задач з нескінченними або напівнескінченними областями, включаючи задачі теорії пружності, акустики та дифракції хвиль. Метод особливо ефективний для аналізу концентрації напруг у тілах з тріщинами та дефектами, де

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує суттєве скорочення обчислювальних витрат порівняно з об'ємними методами. Проте важливим обмеженням МДІУ залишається необхідність побудови матриці повної структури, що створює обчислювальні труднощі великомасштабних завдань. Додатковими недоліками є складність обліку неоднорідностей матеріалу та нелінійних ефектів, а також залежність ефективності методу від існування та доступності фундаментальних рішень.

Область раціонального застосування МДІУ охоплює завдання механіки руйнування, контактні взаємодії, розрахунок акустичних полів та електромагнітних явищ у однорідних середовищах. Таким чином, МДІУ займає спеціалізовану нішу в обчислювальній механіці, перевершуючи об'ємні методи при аналізі сингулярних полів в однорідних середовищах, але поступаючись їм в універсальності для моделювання складних неоднорідних та нелінійних процесів [13, 15].

Метод динаміки багатотільних систем (ММС). Незважаючи на те, що метод багатотільних систем становить основу математичного апарату для моделювання динаміки складних механічних структур [12], слід вказати його особливості через інтегрування в них описаних раніше методів. Сучасні програмні комплекси (Adams, Simpack, RecurDyn та ін.) Забезпечують розрахунок багатокомпонентних систем, що враховує нелінійні кінематичні зв'язки, пружно-демпфуючі елементи, а також складні силові взаємодії між тілами [11].

Метод багатотільних систем є спеціалізованим математичним апаратом для моделювання динаміки складних механічних структур, що складаються з взаємодіючих твердих тіл. На відміну від сіткових методів (МКЕ, МКР) та граничного методу (МДІУ), що оперують з безперервними середовищами, ММС розглядає систему як сукупність абсолютно твердих або деформованих тіл, з'єднаних кінематичними парами та силовими елементами.

Ключовою перевагою ММС є принципово інший підхід, заснований на формалізмах Лагранжа, Ньютона - Ейлера або апроксимації великої кількості частинок (DEM), що забезпечує високу обчислювальну ефективність при

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

моделюванні систем зі значними переміщеннями та складними кінематичними зв'язками. Метод демонструє виняткову ефективність під час аналізу робототехнічних систем, транспортних засобів, біомеханічних об'єктів, де забезпечує фізично коректний опис контактних взаємодій. Проте важливим обмеженням ММС залишається спрощене уявлення деформованих тіл, що вимагає, як було зазначено раніше, інтеграції з МКЕ для аналізу напружено-деформованого стану. Додатковими недоліками є складність обліку розподілених властивостей матеріалів та суттєва залежність точності від коректності опису контактних алгоритмів.

Як випливає з представленого аналізу, метод кінцевих елементів є кращим обчислювальним інструментом, що підтверджує його комплексної реалізації в сучасних промислових САЕ-пакетах при вирішенні подібних завдань. Для вирішення завдання ресурсу та міцності локомотивів визначаються деформації, напруги, переміщення та зусилля, що виникають через силові навантаження при експлуатації локомотивів. Як було сказано у першому розділі, для виявлення ресурсу та міцності ведуться експериментальні дослідження на спеціальному стендовому обладнанні згідно з ГОСТами [7, 8]. Однак експериментальні дослідження відносяться до витратних та дорогих заходів [12].

На сьогоднішній день у програмному забезпеченні виділяються сучасні методи чисельного аналізу напружено-деформованого стану та кінцево-елементного моделювання експлуатаційних навантажень несучих конструкцій локомотивів. Практика показує, що програмне забезпечення, таке як Solidworks, Siemens NX, Ansys Mechanical та ін, добре зарекомендувало себе в оцінці міцності конструкцій, у тому числі для рухомого складу. Представлені програмні продукти використовуються для аналізу із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ). Для виконання структурного аналізу використовуються розширені параметри, включаючи лінійну динаміку, нелінійність, термічний аналіз, властивості матеріалів та композитів та багато іншого [7, 12, 16].

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

В рамках дослідження для аналізу статичного та динамічного напружено-деформованого стану несучої конструкції маневрового тепловоза TEM2 використано програмні комплекси SolidWorks Simulation та Ansys Mechanical [14], що надають інтегровані засоби кінцево-елементного аналізу. Розрахунок напружено-деформованого стану об'ємного тіла методом кінцевих елементів вимагає попереднього створення його просторової геометричної моделі, яке було здійснено в системі автоматизованого проектування SolidWorks.

2.2 Підготовка вихідних даних до виконання статичного розрахунку

На підставі нормативних документів [7, 10, 12] ресурс несучих елементів локомотивів визначається через критерії міцності, включаючи опір втоми. Однак у існуючих підходах розрахунок запасу міцності не враховує у повному обсязі змінного характеру експлуатаційних впливів. Цікаво, що навіть за наявності достатнього коефіцієнта запасу (n) конструкції можуть бути схильні до руйнування через накопичення втомних ушкоджень, особливо в зварних з'єднаннях та інших зонах концентрації напруг [3, 4].

Аналіз стану несучих конструкцій повинен спиратися як на розрахунок напружено-деформируемого стану (НДС), а й у повну оцінку їхньої несучої здатності по опору втоми [6, 8]. У п. 3.1 зазначено, що для вирішення задачі забезпечення несучої здатності широке застосування знаходять кінцево-елементні пакети – такі, як Ansys, NASTRAN та ін.

На відміну від спрощених моделей втомна міцність, в цьому дослідженні пропонується підхід, заснований на обліку реальних експлуатаційних характеристик: геометрії та матеріалу конструкції, щорічного пробігу, а також динамічних навантажень, обумовлених нерівностями шляху. Використання уточнених даних про механічні властивості дозволяє побудувати скориговану криву втоми та виявити найбільш уразливі зони конструкції.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування такої методології дає можливість кількісно оцінити залишковий ресурс та спрогнозувати терміни безпечної експлуатації [1, 3, 6].

Об'єктом дослідження є конструкція маневрового локомотива, що несе, що представляє собою раму візка тепловоза ТЕМ2, виконаного зі сталі марки Ст3кп і що експлуатувалася на залізницях України понад 40 років. Конструкція рами є зварним силовим елементом, що включає боковини, поперечні коробчасті зв'язки, кінцеві балки і литу шкворневу частину. В умовах багаторічної експлуатації дана конструкція зазнавала змінних навантажень, що виникають при взаємодії з верхньою будовою колії, що разом з деградацією металу призвело до зниження її опору втоми [3, 6].

Геометрична модель рами візка побудована за даними технічної документації з урахуванням реального корозійного зношування, а розрахункова сітка включає понад 280 000 тетраедричних елементів із середнім розміром 20 мм. Висока деталізація розрахункової схеми забезпечена формуванням 617610 вузлів і 1852830 рівнянь (рисунок 2.1). Розрахунки виконувались у двох режимах: статичне навантаження та комбіноване навантаження, що враховує навантаження від проходження по профілях нерівностей рейок.

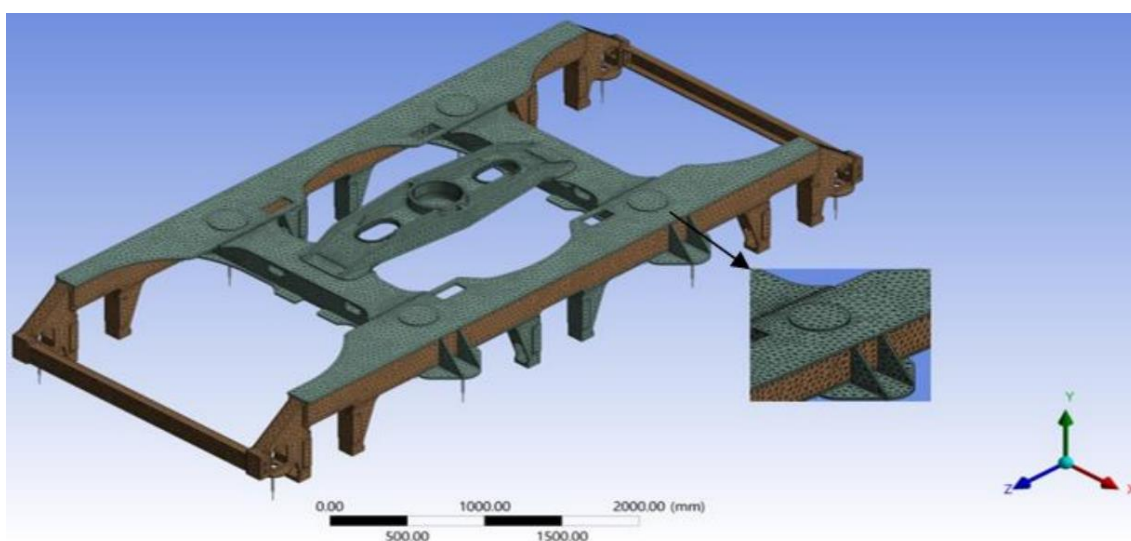


Рисунок 2.1 – Звичайно-елементна сітка рами візка

Для того щоб врахувати податливість ресора підвішування, в модель були введені 12 пружних елементів, що імітують характеристики пружин із заданою жорсткістю і геометрією. Це дозволило відтворити реалістичний розподіл реакцій на опори візка (точки А, Е, F, G) та адекватно змодельовати реакцію конструкції на вертикальні дії, що виникають при проїзді по стиках (рисунок 3.2).

Граничні умови моделювання задані таким чином:

- точка В: зафіксовані переміщення осями x і z (вісь y вільна);
- точка С: переміщення осями y і z вільні (переміщення осі x закріплені);
- точка D: переміщення осями y і z вільні (переміщення осі z закріплені)[13].

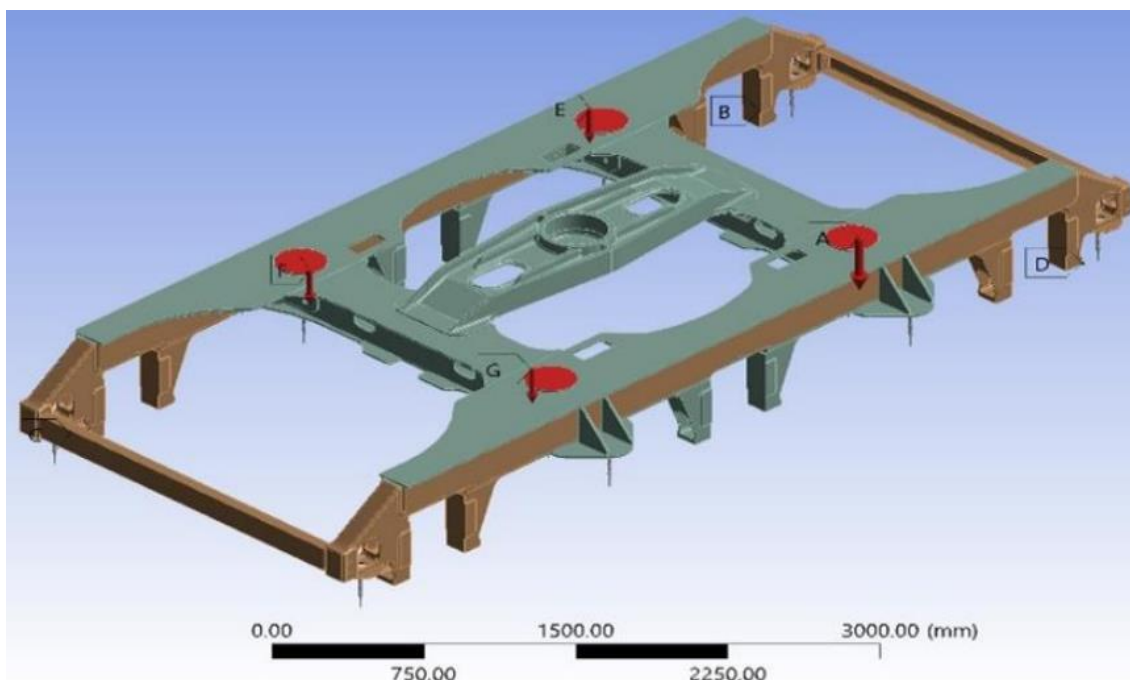


Рисунок 2.2 – Закріплення рами візка та сили, що прикладаються.

Навантаження розраховувалися на основі маси тепловоза ТЕМ2 (120 т) та маси одного візка (23,6 т). Вертикальне навантаження від кузова, що припадає на один візок, складало 36,4 кН. Дане навантаження розподілене між опорами з урахуванням конструктивної схеми [13].

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		46

2.3 Статичний розрахунок рами візка маневрового тепловоза

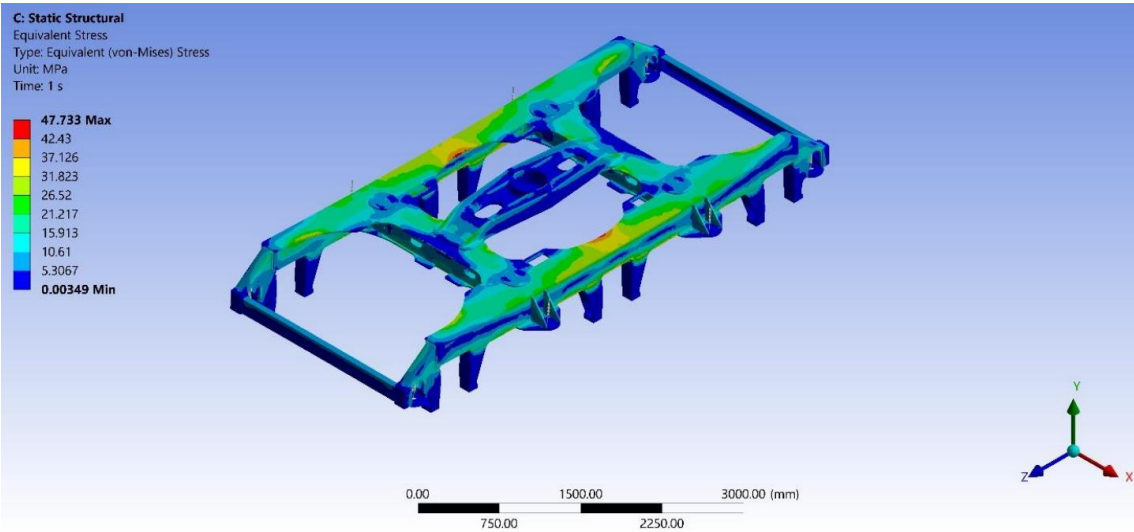
Аналіз напружено-деформованого стану (НДС) рами візка маневрового тепловоза ТЕМ2 було проведено у два етапи [13, 16], кожен з яких імітує певні умови експлуатації. Перший етап – статичне навантаження – дозволяє визначити рівноважний розподіл напруги без урахування тимчасових змін. Другий - багатоциклове навантаження, що враховує динамічну складову, обумовлену впливом нерівностей шляху під час руху локомотива.

У рамках першого етапу навантаження від маси кузова тепловоза (72,8 т), що припадає на візок, розподілялося між чотирма опорними точками конструкції. Облік ресора підвішування дозволив відобразити реалістичну кінематику конструкції і зафіксувати характер деформацій при вертикальному навантаженні. Цей підхід забезпечив можливість коректного перерозподілу зусиль між елементами ходової частини (колісні пари, буксові вузли, рама візка) залежно від жорстких характеристик ресор. Внаслідок цього виявлено зони концентрації напруг, найбільш схильні до втомних ушкоджень, що створює основу для уточненого прогнозування залишкового ресурсу несучих конструкцій.

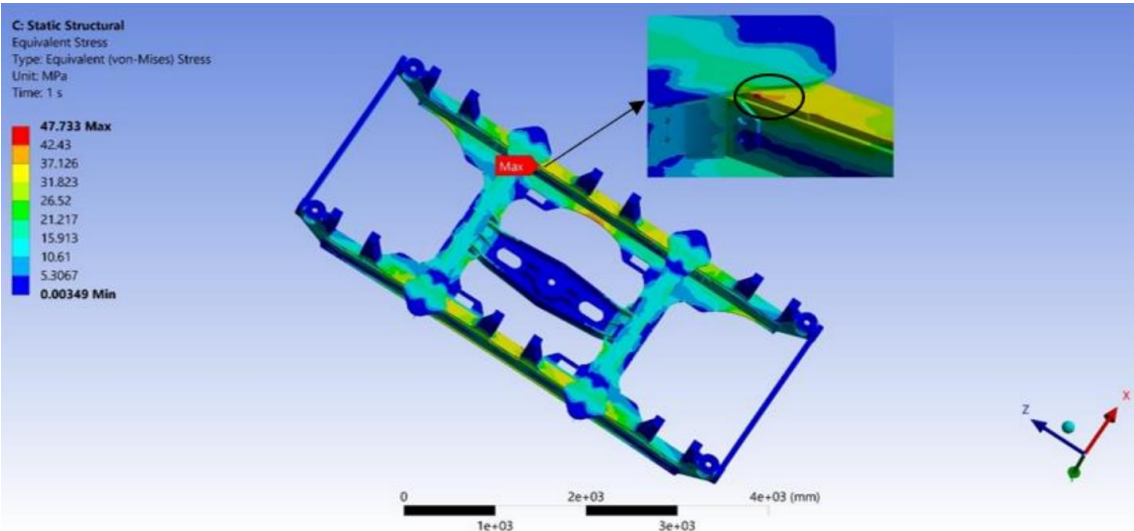
Найбільші напруги були визначені в зонах з'єднань поперечної балки з бічними елементами рами, а також у поєднанні коробчастих щелеп з нижнім поясом. У цих ділянках спостерігаються максимальні значення еквівалентної напруги до 47,7 МПа. Ці зони, по суті, є «концентраторами втоми», що формують потенційні осередки руйнування при циклічних впливах. Отримані кількісні оцінки напруженого стану створюють основу оцінки залишкового ресурсу рами візка з допомогою методів механіки руйнації. Подальший аналіз із застосуванням кривих втоми (кривих Велера) для сталі Ст3 дозволить встановити залежність між амплітудою напруг у виявлених зонах та допустимим числом циклів навантаження до утворення тріщини втоми.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 2.3 представлені результати моделювання НДС та локалізація критичних зон [13].



а)



б)

Рисунок 2.3 – Напружено-деформований стан рами візка (а) та критична точка у статичному стані (б)

Цікаво, що розрахунок коефіцієнтів запасу опору втоми (n) за методикою [7, 8] показує зниження запасу міцності навіть при класичному підході:

- при згинанні – $n = 1,70$;
- при розтягуванні – $n = 1,32$.

Такі значення вважаються низькими, особливо для конструкцій, що відпрацювали понад чотири десятиліття. Слід зазначити, що реальний коефіцієнт опір втоми може виявитися істотно вищим від значень, одержуваних за методиками [7, 10, 13]. Таке припущення впливає з характеру роботи маневрових локомотивів. Як було показано у розділі 1, особливостям роботи маневрових локомотивів слід відносити низькі швидкості руху та низькі значення щодобових пробігів [13]. Далі будуть виконані розрахунки, які враховують вищезгадані особливості.

2.4 Оцінка напруженого-деформованого стану конструкції рами візка тепловоза за напругою, яка допускається

Результати розподілу еквівалентних напруг за розрахунковими режимами навантажень згідно з ГОСТ 34939–2023 представлені у таблиці 2.1. При моделюванні задавалися граничні умови, відповідні реальній схемі закріплення рами на ресорному підвішуванні, і навіть прикладалися розрахункові навантаження, регламентовані кожному режиму експлуатації.

Таким чином, забезпечувалась адекватність розрахункової схеми реальним умовам роботи конструкції. Для кожного з регламентованих режимів у таблиці наведено максимальні значення еквівалентних напруг у критичних зонах, що дозволяє простежити динаміку зміни напруженого стану залежно від виду та комбінації діючих навантажень.

Зіставлення отриманих значень з межею плинності матеріалу (сталь 3сп) і напругами, що допускаються, встановленими нормативною документацією, показує, що міцність конструкції забезпечена у всіх режимах. Аналіз представлених даних виявляє стійку кореляцію між величиною напруг у шкворневих балках та поздовжніми зусиллями, що реалізуються в режимах тяги та гальмування.

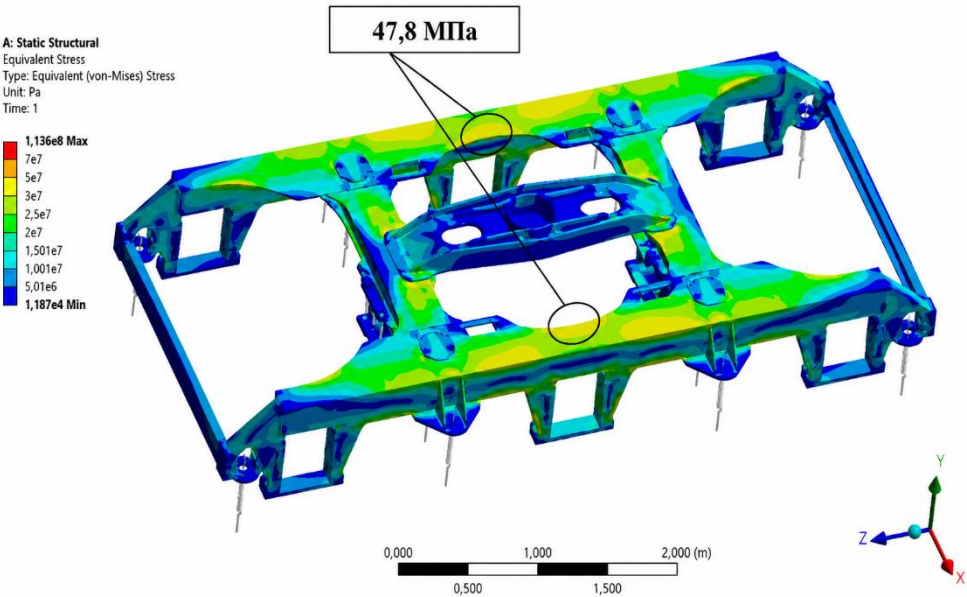
					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Результати розподілу еквівалентних напруг за розрахунковими режимами навантажень

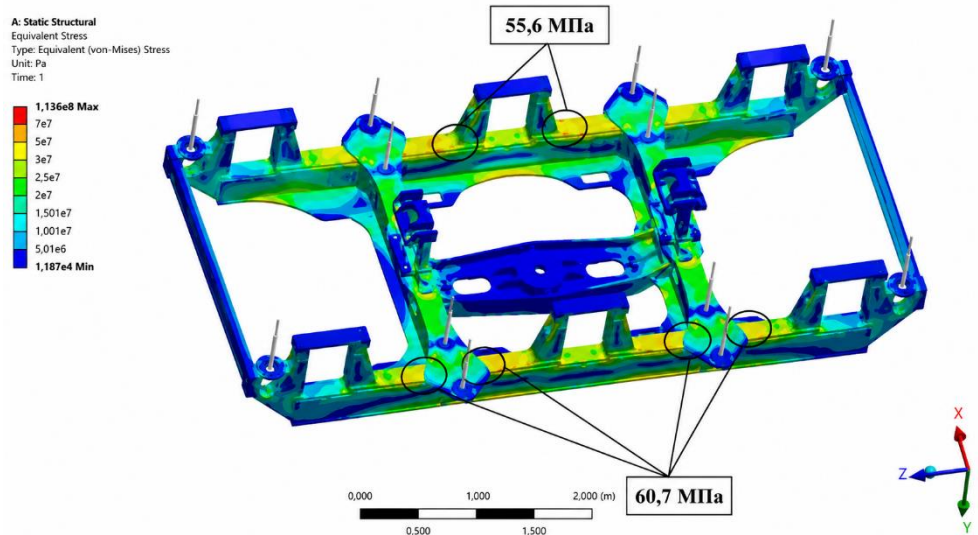
Розрахунковий режим навантаження	Допустимі значення напруги за ДСТУ 34939:2023, МПа		Результати
1	2		3
За дії максимальних ударних сил за режимом Іб	0,9 $\sigma_{0,2}$	221	Не перевищують
Під час руху в кривих ділянках колії з максимальною допустимим непогашеним прискоренням за режимом Іа	0,6 $\sigma_{0,2}$	147	Не перевищують
Під час гальмування за режимом ІІб	0,6 $\sigma_{0,2}$	147	Не перевищують
Під час руху з конструкційною швидкістю на прямих ділянках колії за режимом ІІІ	0,6 $\sigma_{0,2}$	147	Не перевищують

Примітка: $\sigma_{0,2}$ – межа плинності матеріалу для сталі 3сп ($\sigma_{0,2} = 245$ МПа) за ГОСТ 535-88.

Розподіл еквівалентних напруг у рамі візка тепловоза при Іб, Іа, ІІб та ІІІ режимах навантаження наведено на рисунках 2.4–2.9.



а)



б)

а – вид зверху; б – вид знизу

Рисунок 2.4 – Розподіл еквівалентної напруги $\sigma_{\text{екв}}$ при навантаженні вертикальними силами тяжіння

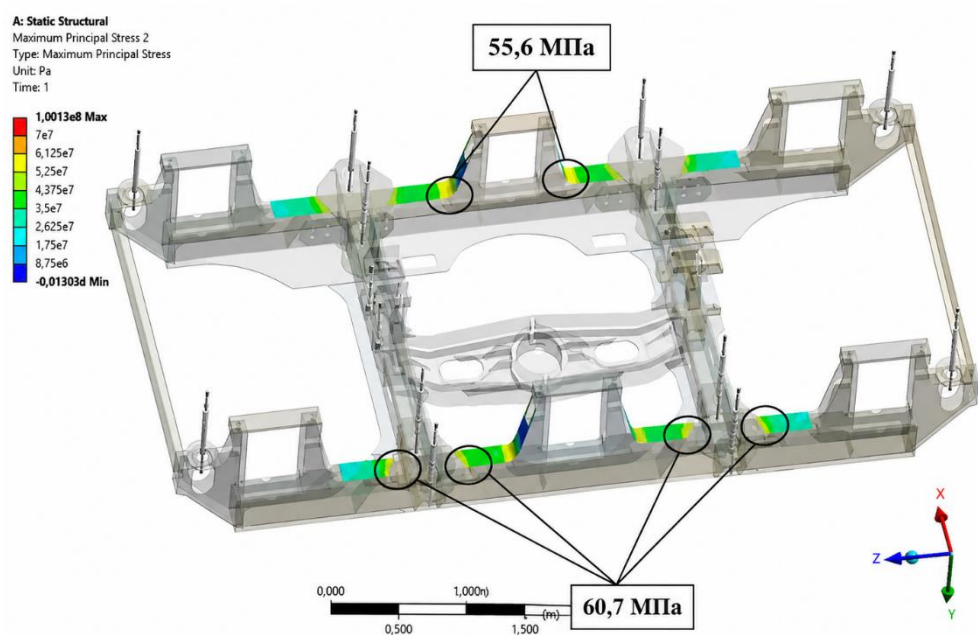


Рисунок 2.5 – Розподіл головної максимальної напруги σ_1 при навантаженні вертикальними силами тяжіння (вид знизу)

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

51

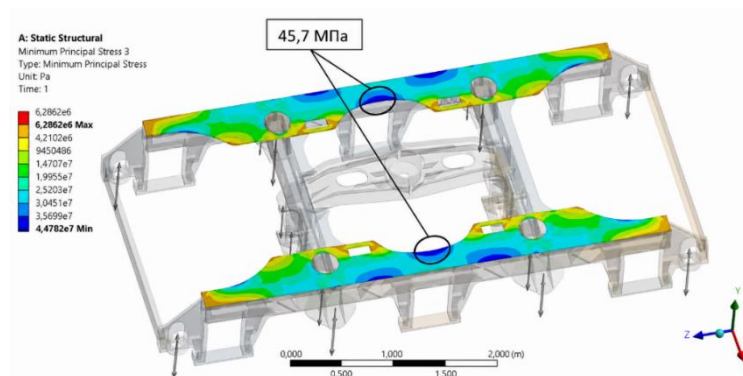
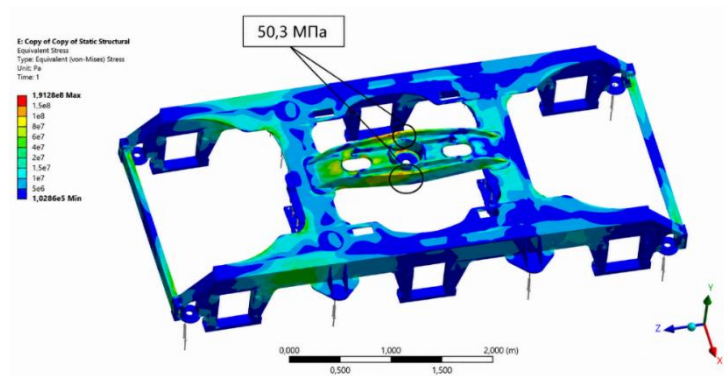
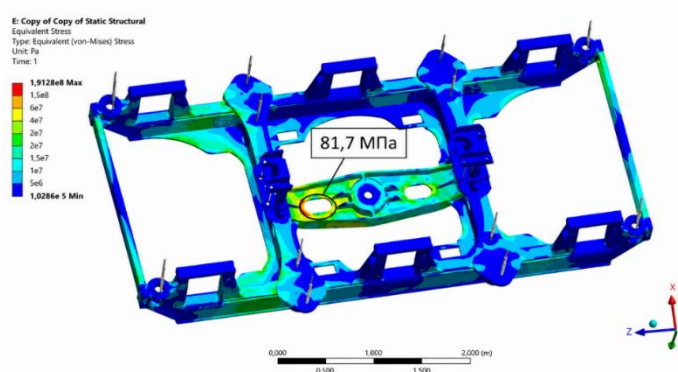


Рисунок 2.6 – Розподіл головних мінімальних напруг σ_1 при навантаженні вертикальними силами тяжкості (вид зверху)



а)



б)

а – вид зверху; б – вид знизу

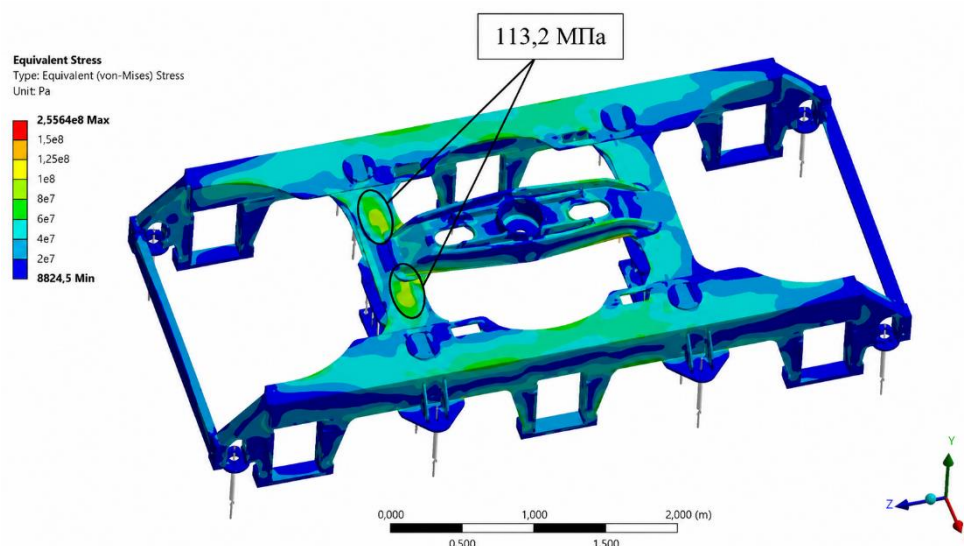
Рисунок 2.7 – Розподіл еквівалентних напруг $\sigma_{\text{екв}}$ при навантаженні рамними силами

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

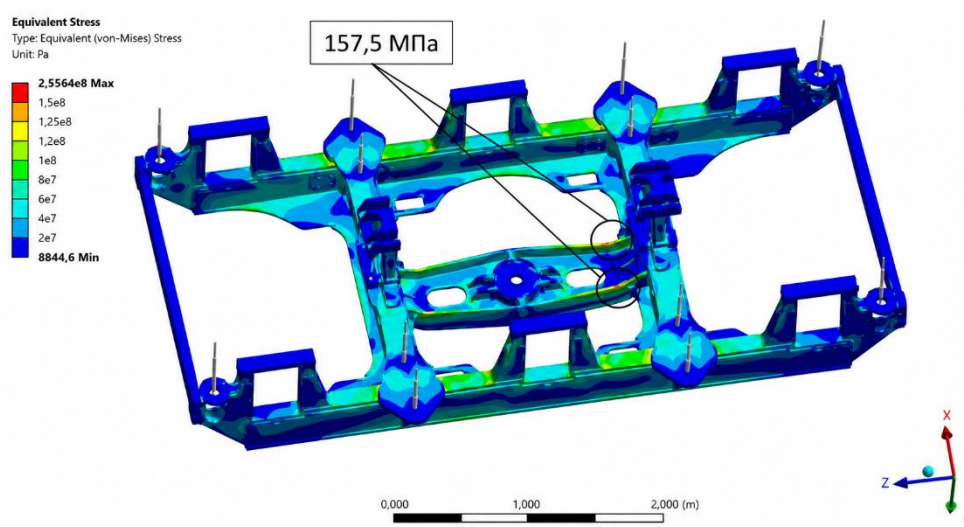
РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

52



а)



б)

а – вид зверху; б – вид знизу

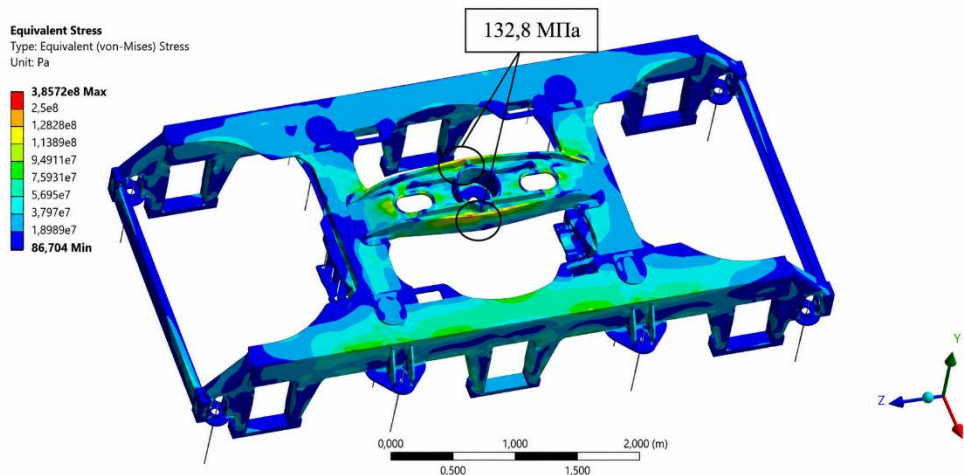
Рисунок 2.8 – Розподіл еквівалентних напруг $\sigma_{\text{екв}}$ у рамі візка при навантаженні максимальними поздовжніми ударними силами за режимом Іб

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

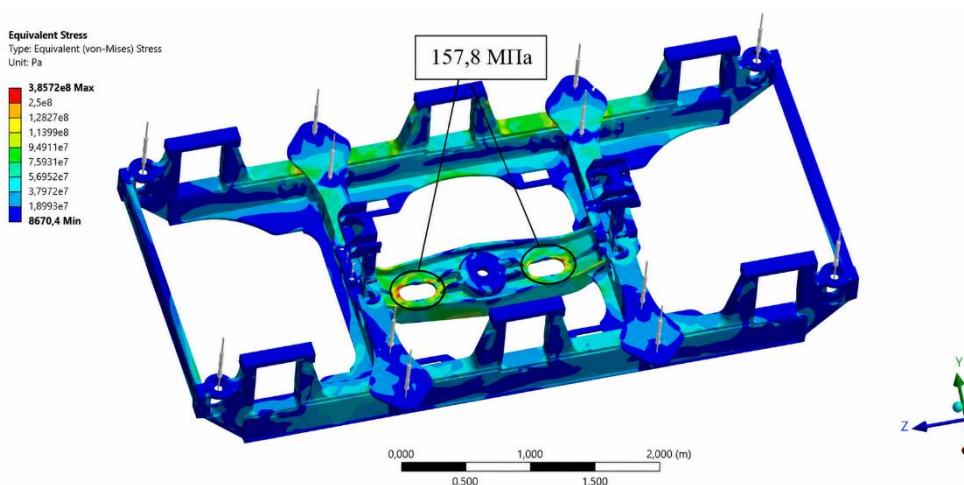
РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

53



а)



б)

а – вид зверху; б – вид знизу

Рисунок 2.9 – Розподіл еквівалентних напруг $\sigma_{\text{екв}}$ при режимі Іа

Виконані розрахунки показали, що для достовірної оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій маневрових локомотивів лише розрахунків коефіцієнтів запасу міцності недостатньо. Незважаючи на те, що значення $n \geq 1,5$ виконуються частково, у конструкціях, що відпрацювали понад 40 років, реальне значення коефіцієнта опору втоми може виявитися істотно вищим за допустиме значення.

Виявлено зони концентрації напруг, таких як ділянки зварювання поперечної балки з боковинами та сполучення коробчастих перерізів з нижнім поясом.

У цих місцях спостерігається підвищений рівень напруги (47,7 МПа) при впливі статичного навантаження, що в умовах багатоциклового навантаження сприяє формуванню вогнищ втомного руйнування.

Виконано розрахунки напружено-деформованого стану рами візка маневрового тепловоза на основі скоригованих механічних характеристик матеріалу. Отримані результати підтвердили, що здатність конструкції, що несе, відповідає вимогам нормативно-технічної документації. Максимальні значення напруги не перевищують встановлених норм.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих методик та підходів до оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій рухомого складу, в результаті якого встановлено, що застосовувані розрахункові схеми недостатньо враховують специфіку експлуатації маневрових локомотивів, зокрема спектральний склад навантажень, вплив стикових нерівностей та локальний характер ушкоджуваності. Показано необхідність комплексного розрахунково-експериментального підходу, що ґрунтується на уточненні динамічної навантаженості та обліку фактичних характеристик матеріалу.

2. Проведено аналіз стану парку маневрових локомотивів залізниць України. Встановлено, що тепловози серії ТЕМ2 формують основу маневрової тяги та переважно експлуатуються за межами нормативного терміну служби. При цьому фактичний технічний стан несучих конструкцій не визначається виключно календарним віком та пробігом, що підтверджує актуальність розробки науково-обґрунтованої методики оцінки залишкового ресурсу.

3. Розроблено та верифіковано просторову динамічну модель маневрового тепловоза ТЕМ2. Отримано адекватну математичну модель, яка відтворює реальні режими експлуатації з урахуванням уточнених характеристик шляху, параметрів ресорного підвішування та мас-інерційних характеристик. Схожість розрахункових та експериментальних даних підтверджує коректність прийнятих припущень та можливість застосування моделі при оцінці ресурсу.

4. Під час дослідження динамічної навантаженості несучих конструкцій доведено необхідність урахування стикових нерівностей для формування розрахункових профілів шляху промислових підприємств. Встановлено, що визначальним фактором для накопичення втомних ушкоджень є не стільки рівень максимальних навантажень, скільки їх спектральний склад, що формується проїздами, що повторюються, по нерівностях і маневровими зіткненнями.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

5. При оцінці та обґрунтуванні залишкового ресурсу несучих конструкцій розроблено методику, що включає формування гістограм навантаження за результатами моделювання, розрахунок напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів, облік фактичних механічних характеристик матеріалу та оцінку втомного пошкодження. Методика адаптована до умов експлуатації залізниць Узбекистану.

6. Експериментальні дослідження механічних властивостей матеріалу рами візка після тривалої експлуатації, включаючи випробування на розтягування, ударну в'язкість, твердість та визначення модуля пружності методом лазерно-ультразвукової структуроскопії, показали збереження характеристик міцності на рівні вимог нормативних документів. Встановлено, що зниження ресурсу зумовлено переважно накопиченням втомних ушкоджень у локальних зонах, а не деградацією механічних властивостей матеріалу в цілому.

7. У рамках дослідження напружено-деформованого стану несучих конструкцій при дії статичних та динамічних навантажень встановлені зони максимальної еквівалентної напруги в рамах візків та головних рамах. Розрахунки показали відсутність перевищення допустимих напруг при нормативних режимах, однак, виявлено локальні зони підвищеної чутливості до циклічного навантаження, що визначають ресурс конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акішин, А. А. Генерація багатовимірною випадкового процесу збурень у задачах динаміки рухомого складу залізниць / А.А. Акішин, А.Н. Савоськін // Науково-технічні відомості політехнічного університету. Інформатики. Телекомунікації. Управління. - 2015. - № 2-3 (217-222). - С. 71-78.
2. Анісімов, П. С. Сили тертя фрикційного клинового гасника коливань / П. С. Анісімов // Світ транспорту. - 2012. - Т. 10. - № 3 (41). – С. 10-13.
3. Бате, К. Чисельні методи аналізу та метод кінцевих елементів / К. Бате, Е. Вілсон. - М.: Будвидав, 1982. - 448 с.
4. Берендєєв, Н. Н. Застосування системи ANSYS до оцінки втомної довговічності [Текст]: учеб.-метод. посібник / Н. Н. Берендєєв: НГУ, 2006. - 83 с.
5. Бірюков, І. В. Механічна частина тягового рухомого складу: підручник для вузів ж.-д. трансп. / І. В. Бірюков, А. Н. Савоськін, Г. П. Бурчак; за ред. І. В. Бірюкова. - М.: Транспорт, 1992. - 440 с.
6. Веріго, М. Ф. Вертикальні сили, що діють на шлях при проходженні рухомого складу [Текст] / М. Ф. Веріго // Праці ВНІІЗТ. - 1955. - Вип. 19. - С. 25-288.
7. Веріго, М. Ф. Взаємодія колії та рухомого складу у кривих малого радіусу та боротьба з бічним зносом рейок та гребенів коліс / М. Ф. Веріго. - М., 1997. - 207 с.
8. Махутов, Н. А. Деформаційні критерії руйнування та розрахунок елементів конструкцій на міцність / Н. А. Махутов. - М.: Машинобудування, 1981. - 272 с.
9. Медель, В. Б. Рухомий склад електричних залізниць / В.Б. Медель. - М.: Транспорт, 1974. - 232 с.
10. Медель, В. Б. Динаміка електровоза / В. Б. Медель. - М.: Трансжелдоріздат, 1977. - 414 с.

					РДБ.ЗТ-22д.02 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Оцінка довговічності та залишкового ресурсу рам візків локомотивів / Б. Б. Бунін, Е. С. Оганьян, Т. М. Пономарьова // Важке машинобудування. - 2007. - № 11. - С. 31-33.

12. Ушкалов, В. Ф. Розрахункові обурення для оцінки динамічних якостей вантажних вагонів / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапіна, І. А. Мащенко // Наука та техніка транспорту. - 2013. - № 4 (46). - С. 135-144.

13. Норми для розрахунку міцності несучих елементів, динамічних якостей та впливу на шлях екіпажної частини локомотивів залізниць колії 1520 мм. - М.: ВНИИЖТ, 1998. - 145 с.

14. Коссов, В. С. Застосування програмного комплексу «Універсальний механізм» при створенні рейкового рухомого складу / В. С. Коссов, Г. С. Міхальченко, Д. Ю. Погорєлов // Вісник ЛДУ ім. В. Даля. - 2005. - № 8. - С. 45-48.

15. Когаєв, В. П. Розрахунок деталей машин на міцність при напругах, змінних у часі / В. П. Когаєв. - М: Машинобудування, 1977. - 130 с.

16. Зенкевич, О. Кінцеві елементи та апроксимація / О. Зенкевич, К. Морган. - М.: Світ, 1986. - 318 с.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		