

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»
(назва факультету)

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Модернізація конструкції хребтових балок напіввагонів та вагонів бункерного типу для перевезення зерна

за освітньою програмою «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання»

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент

групи: ПМ2221


(підпис студента)

/ Віталій НЕСКОРОДЄВ /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

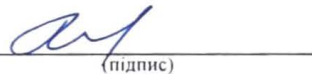
Керівник:


(підпис)

/ Сергій РАКША /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

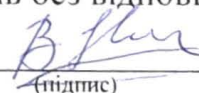

(підпис)

/ Олександр ПОСМІТЮХА /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

Дніпро – 2024

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»
(назва факультету)

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Модернізація конструкції хребтових балок напіввагонів та вагонів бункерного типу для перевезення зерна**

за освітньою програмою «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання»

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ПМ2221

(підпис студента) / Віталій НЕСКОРОДЄВ /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

(підпис) / Сергій РАКША /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

(підпис) / Олександр ПОСМІТЮХА /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Дніпро – 2024

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty of Transport Engineering
(faculty)

Department of Applied Mechanics and Materials Science
(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: **Modernization of the design of spine beams for semi-wagons and bunker-type wagons for grain transportation**

according to educational curriculum «Lifting, transport, construction, road, reclamation machines and equipment»

in the Speciality: 133 Industrial machinery engineering
(speciality and its code)

Done by the student of the group: IIM2221 / Vitalii NESKORODIEV /
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Serhii RAKSHA /
(position, name, surname)

Normative controller : / Oleksandr POSMITIUKHA /
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Транспортна інженерія

Кафедра: Прикладна механіка та матеріалознавство

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Освітня програма: Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

_____ **Сергій РАКША**
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу _____ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(ступінь вищої освіти)

студенту Нескородєву Віталію Ігоровичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: **Модернізація конструкції хребтових балок напіввагонів та вагонів бункерного типу для перевезення зерна**

Керівник роботи: Ракша Сергій Васильович, д. т. н., професор

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом від "02" 12 2022 р. № 1193ст

2. Строк подання студентом роботи: 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Конструктивне виконання базових рам напіввагонів та вагонів бункерного типу. Вимоги ДСТУ 7598:2014 "Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)".

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Техніко-економічне обґрунтування дослідження

4.2 Конструктивне виконання базових рам напіввагонів та вагонів бункерного типу.

4.3 Вибір методу розрахунку та побудова розрахункової схеми.

4.4 Основні розрахункові навантаження.

4.5 Результати розрахунків.

4.6 Аналіз результатів розрахунку. Висновки

5. Перелік демонстраційного матеріалу:

Конструктивне виконання базових рам вантажних вагонів до та після модернізації. Скінчено-елементні моделі. Схеми навантаження. Результати розрахунків. Порівняння напружено-деформованого стану базових рам вагонів до та після модернізації

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування дослідження	22.03.2023	
2	Конструктивне виконання базових рам напіввагонів та вагонів бункерного типу	06.06.2023	
3	Вибір методу розрахунку та побудова розрахункової схеми.	20.09.2023	
4	Вибір розрахункових навантажень.	03.10.2023	
5	Проведення розрахунків.	10.11.2023	
6	Аналіз результатів розрахунку. Висновки	02.12.2023	
7	Підготовка презентації роботи	20.12.2023	
8	Подання кваліфікаційної роботи до захисту	25.12.2023	

Дата видачі завдання: « 20 » грудня 2022 р.

Студент

(підпис)

Віталій НЕСКОРОДСЬ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Сергій РАКША

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Кількість томів: 1

В пояснювальній записці всього 54 сторінки

Найменування роботи: МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ХРЕБТОВИХ БАЛОК НАПІВВАГОНІВ ТА ВАГОНІВ БУНКЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНА

Ілюстрації: схем 4, рисунків 25,

таблиць 15,

Ключові слова: ВАНТАЖНИЙ ВАГОН, БАЗОВА РАМА, СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ, РОЗРАХУНКОВІ РЕЖИМИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЇ.

Текст реферату:

В даній роботі наведено результати порівняльного розрахунку базової рами напіввагона з хребтовою балкою виготовленою з використанням зет профілю та модернізованої балки з профілю у вигляді швелера.

Для проведення досліджень обрано метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє урахувати основні конструктивні особливості конструкції, спосіб її закріплення (граничні умови) та розрахункові навантаження.

Розрахунки виконано за I-м та III-м розрахунковими режимами у відповідності до вимог ДСТУ 7598:2014 «ВАГОНИ ВАНТАЖНІ. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)».

В результаті аналізу проведених досліджень встановлено, що напруження в елементах базової рами вагона з модернізованою хребтовою балкою не перевищують напружень в елементах вихідного варіанту базової рами та відповідають вимогам ДСТУ 7598:2014.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
2. КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ ТА ВАГОНІВ БУНКЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНА. ВИБІР МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
2.1. Конструкція кузова напіввагона	11
2.2. Конструкція кузова вагона для зерна	14
2.3 Вибір методу досліджень	16
3. РОЗРАХУНКОВІ РЕЖИМИ.....	18
4. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ НАВАНТАЖЕННЯ	22
4.1. Вертикальні сили	23
4.1.1. Сила тяжіння бруто кузова	23
4.1.2 Вертикальна добавка від поздовжньої сили інерції кузова.....	24
4.1.3 Вертикальне динамічне навантаження	27
4.2. Поздовжні сили	29
4.3 Сили в разі нецентральної взаємодії автозчепів двох вагонів.....	30
5. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ.....	33
5.1 Розрахункова схема	33
5.2 Результати розрахунків за I-м розрахунковим режимом.....	34
5.3 Результати розрахунків за III-м розрахунковим режимом.....	40
5.4 Перевірка міцності кузова на опір втомі	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

					ДІТ.300000.612.КРПЗ		
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Студент		Нескородєв В.І.			Літ.	Арк	Аркушів
Керівник		Ракша С.В.				6	54
Н. Контр.		Посмітюха О.П.			<i>ДІТ гр. ПМ2221</i>		
Затвердив		Ракша С.В.					

Модернізація конструкції
хребтових балок напіввагонів
та вагонів бункерного типу для
перевезення зерна

ВСТУП

Транспортування вантажів на великі відстані по суші здійснюється переважно залізничним транспортом. Завдяки добре розвиненій мережі залізниць в Україні та Європі, доставка вантажів залізничним транспортом можлива майже скрізь. Що особливо важливо, цей спосіб дозволяє доставити одразу велику партію вантажу за один рейс.

Основним видом рухомого складу, який використовується для перевезення будь-яких вантажів, є вантажний вагон.

До вагонів вантажного парку Укрзалізниці відносяться: криті вагони, напіввагони, платформи, вагони-цистерни, вагони бункерного типу, думпкари, транспортери та інші. Така різноманітність вагонного парку дозволяє досягти оптимальних умов перевезення, завантаження та вивантаження будь-якого роду вантажу, максимально спростивши процес доставки залізничним транспортом.

Одним з основних типів вантажних вагонів є напіввагони. Напіввагон - залізничний вантажний вагон з високими бортами, призначений для перевезення вантажів, що не потребують захисту від атмосферних опадів (руда, вугілля, флюси, лісоматеріали тощо). Кузов напіввагона не має даху, що забезпечує зручність завантаження та вивантаження вантажів.

Останнім часом в вантажних перевезеннях, які здійснює Укрзалізниця, велику роль відіграють вагони бункерного типу для перевезення зерна. Кузов вагона для зерна має форму воронки, в нижній частині якого розташовані люки для розвантаження.

Конструкції усіх типів вантажних вагонів, які виготовляються в Україні різними виробниками, уніфіковані та потребують певного переліку металопрокату. У разі зміни прокатного профілю, який використовувався для виготовлення будь якого конструктивного елемента вагона, підприємство - виробник повинне довести можливість такої заміни. Для чого, у відповідності до діючих в Україні нормативних документів, необхідно провести ряд теоретичних та експериментальних досліджень.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

В даній роботі наведені результати теоретичних досліджень пов'язаних з відсутністю на підприємствах-виробниках рухомого складу зет профілю, який використовувався для виготовлення хребтових балок майже усіх типів вантажних вагонів та поставлявся з російської федерації. А саме, розглядається можливість заміни означеного прокатного профіля на прокатний профіль у вигляді швелера.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виробництво вантажних вагонів в Україні - це одна з галузей машинобудування, яка займається виробництвом рухомого складу для залізничного транспорту. На кінець 2021 в Україні нараховувалося понад 10 підприємств виробників вантажних вагонів, найбільш потужними з яких були:

- ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук);
- ПАТ «Дніпровагонмаш» (м. Кам'янське),
- ПАТ «Стаханівський вагонобудівний завод» (м. Стаханів)
- ПАТ «Азовмаш» (м. Маріуполь)
- ДП «Укрспецвагон» (м. Лозова),
- ДМЗ «Карпати» (м Новий Розділ, Львівська обл.)
- Дарницький ВРЗ (м. Київ)

На даний час виробництво вантажних вагонів в Україні зазнає ряду труднощів, пов'язаних з початком військової агресії російської федерації проти України. Так, кількість підприємств виробників вантажних вагонів фактично скоротилося до двох: ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» ПАТ «Дніпровагонмаш». Крім того, значна кількість українських вагонів залишилися на території країни-агресора. Усе це призвело до значного дефіциту вантажних вагонів в Україні, особливо вагонів для перевезення зерна та напіввагонів.

Стан залізничної галузі також ускладнився відсутністю деяких типів прокатних профілів, які використовувалися для виробництва вантажних вагонів. А саме, прокатних профілів з формою поперечного перерізу у вигляді зета, які є основним несучим елементом більшості типів вантажних вагонів: платформ, напіввагонів, вагонів-цистерн, вагонів бункерного типу та ін. Малочисельні підприємства виробники вантажних вагонів опинилися на грані зупинки.

Перед українськими вагонобудівними заводами постало завдання використання іншого типу прокатного профілю, такого, який виробляють вітчизняні металургійні підприємства. Вирішення цієї задачі потребує декілька обов'язкових етапів, основним з яких є проведення теоретичних досліджень з метою оцінки можливості заміни в конструкції хребтових балок прокатних

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

профілів у вигляді зета на інший прокатний профіль, який масово виготовляється Українськими металургійними заводами. Одним з варіантів такої заміни є заміна зет профілю на профіль у вигляді двотавра (4,5).

Тому задача, яка полягає в оцінці можливості заміни в конструкції вантажних вагонів прокатних профілів у вигляді зета на інший прокатний профіль, для залізничної галузі є актуальною. Поставлена задача вирішується шляхом проведення порівняльного розрахунку базової рами напіввагона з хребтовою балкою, виготовленою з використанням зет профілю, та модернізованої балки з профілю у вигляді швелера.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

2. КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ ТА ВАГОНІВ БУНКЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНА. ВИБІР МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕНЬ

У якості об'єктів дослідження обрано напіввагон моделі 12-783 та вагон бункерного типу для перевезення зерна моделі 19-765 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук). Інформація з техніко-експлуатаційних характеристик означених вагонів знайдена на сайті kvbz.com.

2.1. Конструкція кузова напіввагона моделі 12-783

Універсальний напіввагон моделі 12-783 спроектований за габаритом 1-Т та має характеристики, зазначені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики напіввагона моделі 12-783

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Вантажопідйомність, не більше, т	70,0
Об'єм кузова, м ³	78
Маса тари, не більше, т	24,0
Розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки, кН (тс)	230,5 (23,5)
База вагона, мм	8650
Довжина вагона по осям автозчеплень, мм	13920
Габарит по ДСТУ Б.В.2.3.-29	1-ВМ
Внутрішні розміри кузова, мм:	
- довжина	12 790
- ширина	2 990
- висота	2 045
Візок	18-7055
Міжремонтний пробіг, років (тис.км)	3(210)
Конструкційна швидкість, км/год	120
Термін служби, років	22

Загальний вигляд напіввагона моделі 12-783 та його основні розміри наведено відповідно на рис. 2.1 та рис. 2.2.



Рис.2.1. Напіввагон моделі 12-783

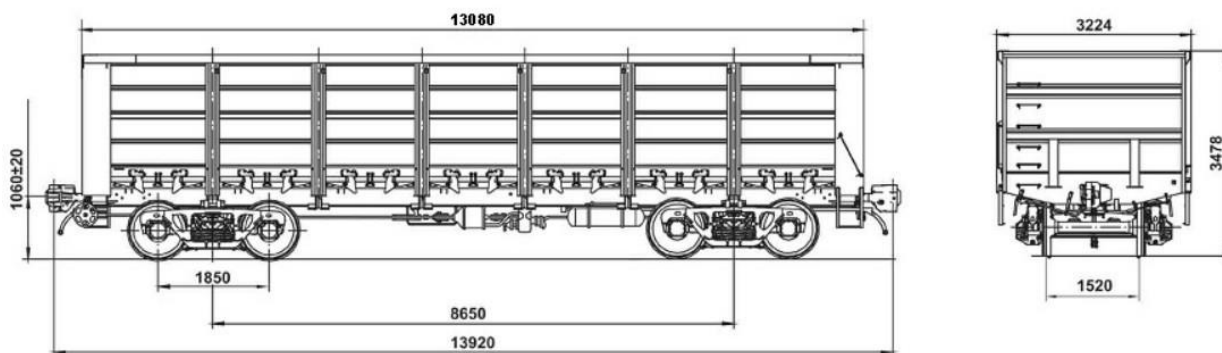


Рис.2.2. Основні розміри напіввагон моделі 12-783

Кузов напіввагона суцільнометалевий із 14-ма розвантажувальними люками у підлозі. Він складається з базової рами, металевих бічних та торцевих стін, розвантажувальних люків з кришками, що утворюють підлогу.

Базова рама кузова (рис. 2.3) має хребтову, дві кінцеві, дві шкворневі та вісім проміжних поперечних балок.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПТ.300000.612.КРПЗ

Арк

12

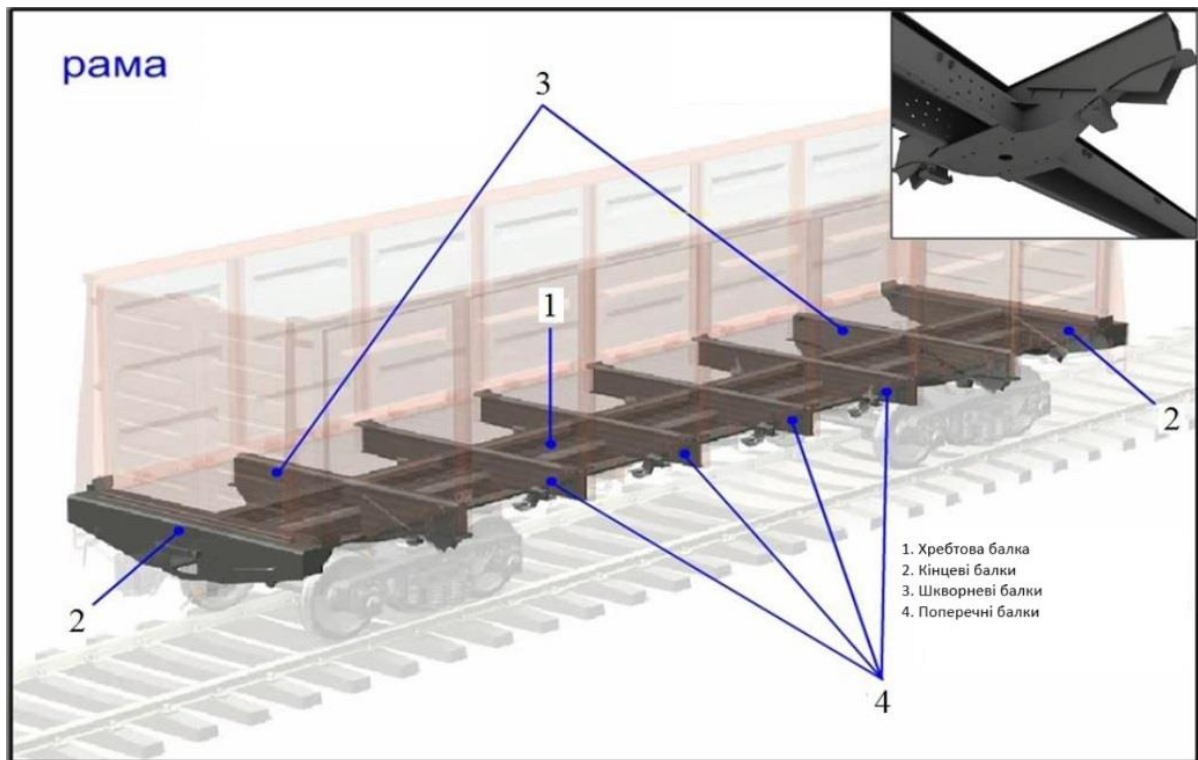


Рис. 2.3. Базова рама напіввагона

Хребтова балка зварена з двох Z-подібних профілів №31 з місцевими посиленнями та в місці з'єднання перекритих двотавром №19. В даній роботі розглядається також варіант виготовлення хребтової балки з використанням двох швелерів №30 (рис. 2.4).

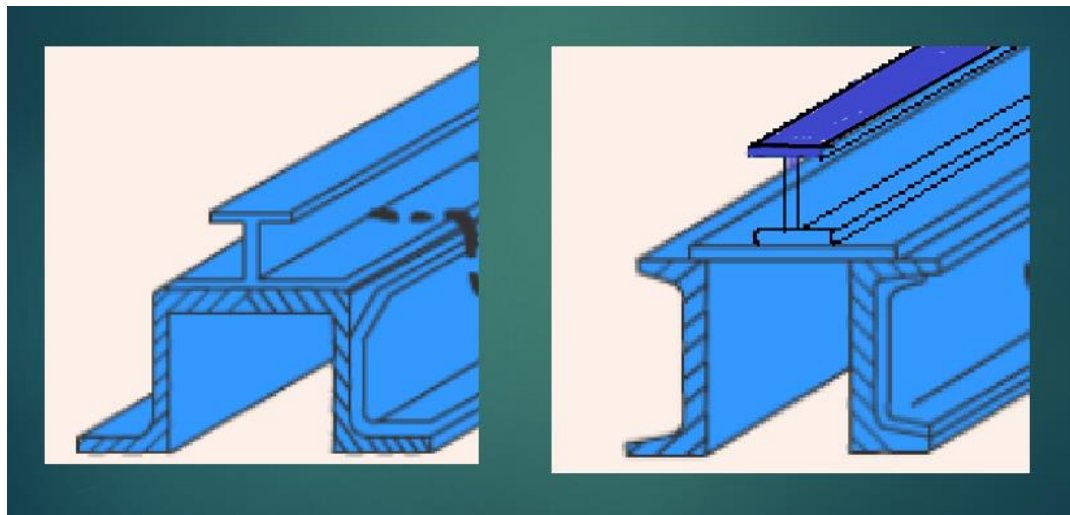


Рис. 2.4. Поперечний переріз хребтової балки у базовому виконанні та після модернізації

На двотаври кріплять петлі, на які навішують кришки розвантажувальних люків. У консольній частині хребтової балки встановлені передні та задні упори

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

автозчеплення. Кінцева балка зварена коробчастого перерізу. Вона складається із штампованого Г-подібного листа товщиною 8 мм, додаткових вертикального та нижнього горизонтального листів. Шкворневі балки також зварені коробчастим перерізом. Вертикальні листи мають товщину 8 мм, горизонтальні 10 мм (верхні), нижні – 14 мм. До нижнього горизонтального листа шкворневих балок кріпляться п'ятники.

2.2. Конструкція кузова вагона для зерна моделі 19-765

Вагон для перевезення зерна є вагоном типу хопер та належать до категорії спеціалізованого рухомого складу [3,10]. Відмінною особливістю конструкції таких вагонів є форма кузова. Він має вертикальні бічні та похилі торцеві стіни, а внизу виконаний у вигляді бункера. Така конструкція кузова дозволяє забезпечити саморозвантажувальність вантажу. При цьому використовуються гравітаційні властивості вантажу. Він сповзає по похилих стінках до розвантажувальних люків бункерів.

Вагон для перевезення зерна моделі 19-765 спроектований за європейським габаритом IRR (RAI) та має характеристики, зазначені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики вагона для зерна моделі 19-765

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Вантажопідйомність, не більше , т	67,0
Об'єм кузова, м ³	80,0
Маса тари, не більше, т	23,0
Розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки , кН(тс)	220,5 (22,5)
База вагона, мм	9 000
Довжина вагона по осях автозчеплень , мм	13 220
Габарит:	
- кузова	IRR (RAI)
- візка по ДСТУ Б.В.2.3.-29	02-ВМ (03-ВМ)
Висота рівня головок рейок до вісі зчеплення автозчеплень, мм	1040...1080

					ДІП.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Число люків:	
- завантажувальних	4
- розвантажувальних	6
Візок	18-7055
Конструкційна швидкість , км/год	120
Міжремонтний пробіг, км	210 000
Строк служби, років	26

Загальний вигляд вагона для зерна моделі 19-765 та його основні розміри наведено відповідно на рис. 2.1 та рис. 2.2.



Рис.2.5. Вагон для зерна моделі 19-765

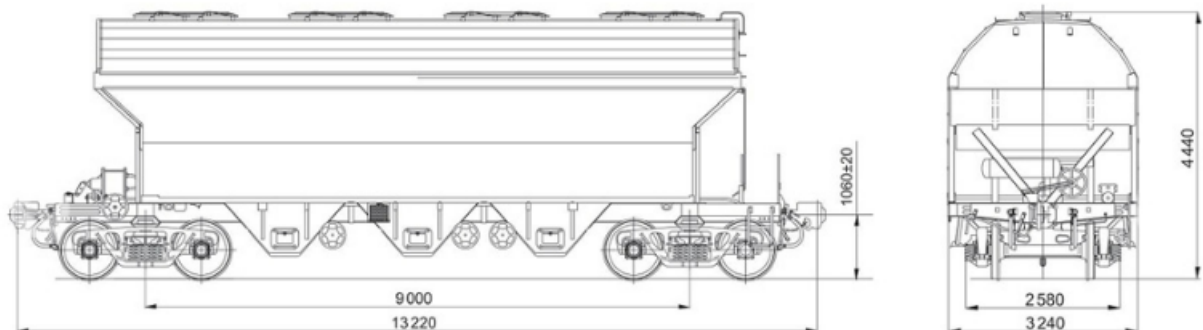


Рис.2.6. Основні розміри вагона для зерна моделі 19-765

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Кузов вагона суцільнометалевий, зварної конструкції. Рама вагона для зерна (рис. 2.7) в основному ідентична базовій рамі напіввагона (різниця полягає в кількості та конструкції поперечних балок) та складається з хребтової (повністю ідентичній хребтовій балці напіввагона), двох бічних, двох шкворневих, однієї середньої поперечної та двох кінцевих балок.

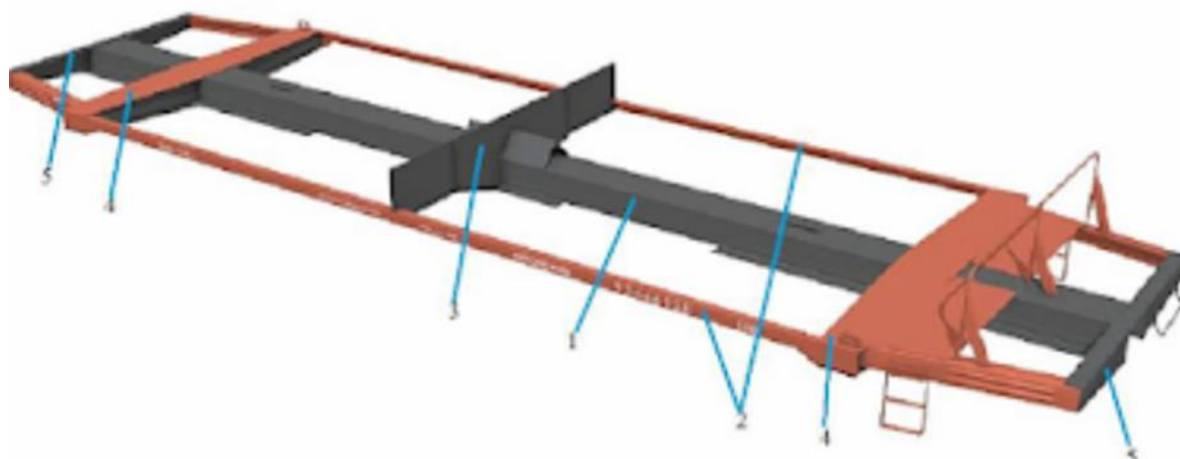


Рис. 2.7. Базова рама вагона типу хопер. Цифрами на рисунку позначені: 1- хребтова балка, 2- бокові балки, 3- поперечна балка, 4- шкворневі балки, 5- кінцеві балки.

Хребтова балка також виготовляється із двох балок зетового профілю №31. Бічні балки виготовлені з кутика (125X80X10 мм). Шкворневі балки коробчастого перерізу зварені із двох вертикальних та двох горизонтальних листів та ідентичні шкворневим балкам напіввагона. Кінцеві балки Г-подібної форми відштамповані з листа завтовшки 4 мм. Середня балка включає вертикальний і нижній горизонтальний листи.

2.3 Вибір методу досліджень

Для проведення досліджень, пов'язаних з аналізом напружено-деформованого стану несучих конструкцій вагонів, обрано метод скінчених елементів (МСЕ). Метод скінчених елементів є основним методом сучасної будівельної механіки та лежить основі переважної кількості сучасних

програмних комплексів призначених для розрахунку на міцність, жорсткість та стійкість інженерних конструкцій [6,7,8,9].

Основна ідея методу скінчених елементів полягає в тому, що неперервне тіло представляється у вигляді сукупності скінчених елементів, які з'єднані у вузлових точках, переміщення яких приймаються в якості невідомих методу.

До переваг методу скінчених елементів можна також віднести те, що він дозволяє врахувати всі основні властивості матеріалів і геометрію реальної конструкції, спосіб її закріплення та розглядати будь-яке поєднання розрахункових навантажень [2].

У якості програмного комплексу, який реалізує метод скінчених елементів, обрано програмний комплекс SCAD [7]. Програмний комплекс SCAD використовується в університеті в навчальних цілях.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

3. РОЗРАХУНКОВІ РЕЖИМИ

Згідно [1], розрахунок на міцність кузова виконується при дії найбільш несприятливого поєднання одночасно діючих незалежно одна від одної сил, значення яких отримано в розділі. Таке поєднання одночасно діючих незалежно одна від одної сил відповідає двом основним розрахунковим режимам:

I режим – умовний режим безпеки;

III режим – експлуатаційний.

За I розрахунковим режимом необхідно розглядати відносно рідкісне поєднання екстремальних навантажень. Умовам експлуатації за I режимом для вантажних вагонів відповідають осаджування і зрушення рухомого складу з місця, зіткнення вагонів під час маневрів, зокрема й під час розпуску з гірок, екстрене гальмування в потягах за малих швидкостях руху або зіткнення вагонів у позаштатних ситуаціях, а також аварійний ривок (поштовх).

За III розрахунковим режимом необхідно розглядати відносно часте поєднання помірних за величиною навантажень, характерних для роботи вагона в рухомому потязі. Основна вимога в разі проведення розрахунків за цим режимом – не допустити втомного руйнування вузла або деталі, надмірного зносу, втрати стійкості конструктивних елементів.

В умовах експлуатації III розрахунковому режиму відповідають випадки руху вагона з повним навантаженням у складі потягу по прямих і кривих ділянках колії та стрілочних переводах відповідної конструкції й стану з допустимою швидкістю, аж до конструкційної, під час періодичних службових регульовальних гальмувань, періодичних помірних ривків і поштовхів, штатної роботи механізмів і вузлів вагона.

Сполучення розрахункових навантажень, які відповідають I-му та III-му розрахунковим режимам наведено в таблиці 3.1 (таблиця 5.3 норм [1])

Таблиця 3.1

Значення і сполучення основних навантажень для розрахунку на міцність кузовів

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Назва основних розрахункових навантажень	Значення навантажень	
	Розрахункові режими	
	I	III
Поздовжні навантаження	Відповідно до 5.4.1	Відповідно до 5.4.1
Вертикальні навантаження:		
— сили тяжіння бруто	Відповідно до 5.2.5	Відповідно до 5.2.5
— вертикальне динамічне навантаження	Не враховують	Відповідно до 5.2.5 за $V_{\text{констр}}$
— вертикальна добавка від дії поздовжньої сили інерції кузова ¹⁾	Відповідно до 5.4.3	Не враховують

Зміст пунктів норм [1] на які є посилання в таблиці:

5.4.1 До основних розрахункових поздовжніх навантажень належать сили стискання і розтягування (квазістатичні та динамічні) під час взаємодії вагонів із локомотивом і поміж собою в складі потяга, обумовлені дією сил тяги і гальмування, а також сили аеродинамічного опору, що виникають під час перехідних і сталих режимів руху потяга, у режимах транспортування їх та в особливих ситуаціях.

Значення поздовжніх навантажень у розрахунках на міцність наведено в таблиці 5.1.

Поздовжні сили прикладають до передніх (у разі розтягування, ривка) або задніх (у разі стискання, удару) упорів на рівні осі автотзепного устаткування вагонів, при цьому потрібно враховувати конструкційний ексцентриситет поздовжньої осі автотзепу відносно центра ваги перерізу хребтової балки.

Таблиця 5.1 — Значення поздовжніх навантажень для розрахування на міцність

Тип вагона	Значення поздовжнього навантаження, МН			
	Розрахункові режими			
	I		III	
	квазістатична сила	удар, ривок	квазістатична сила	удар, ривок
Вантажні вагони основних типів	- 2,5 ¹⁾ + 2,0 ²⁾	- 3,5 + 2,5	- 1,0 + 1,0	- 1,0 + 1,0
Ізотермічні вагони, хопердозатори, вагони-самоскиди та інші вузькоспеціалізовані вагони ³⁾	- 2,5 + 2,0	- 3,0 + 2,5	- 1,0 + 1,0	- 1,0 + 1,0

¹⁾ Знак «-» для зусилля стискання, удару, знак «+» для зусилля розтягування, ривка.
²⁾ Час дії імпульсних зусиль удару й ривка і вважають таким, що дорівнює 0,3 с.
³⁾ Вагони, що не підлягають розпуску з сортувальних гірок.

5.2.5 Для попередніх розрахувань значення вертикального динамічного навантаження на елементи вагона від коливань під час руху в складі потяга визначають множенням сили тяжіння бруто, що діє на розрахунковий вузол, на коефіцієнт вертикальної динаміки.

Силою тяжіння бруто в цьому разі вважають силу тяжіння вантажу й власну силу тяжіння елементів вагона, розташованих над ступенем ресорної підвіски, що розглядають, разом з 1/3 сили тяжіння ресорної підвіски.

5.4.3 Вертикальну динамічну силу (доповнення) на візок (P_z), у ньютонях, що розраховують від дії поздовжньої сили інерції кузова, визначають за формулою:

$$P_z = F_{\text{ин}} \cdot \frac{h_k}{2l}, \quad (5.14)$$

де $F_{\text{ин}}$ — поздовжня сила інерції кузова бруто, визначають за формулою (5.12) або (5.13), Н;

h_k — відстань від центра ваги кузова до осі автотзепу, м;

$2l$ — база вагона, м.

Така сама сила (реакція) діє на опорні елементи кузова.

									Арк
									19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Основна вимога в разі розрахунків на міцність за I-м режимом – не допустити появи залишкових деформацій і руйнування кузова та інших вузлів і деталей вагона, втрати стійкості форми елементів тощо. Допустимі напруження в елементах рами кузова для I-го розрахункового режиму наведені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2.

Допустимі напруження для I-го розрахункового режиму

Марка матеріалу, клас міцності	Квазістатична сила, МПа	Удар, ривок, МПа
Хребтова і шворнева балки рами кузова		
Сталь – 09Г2С (клас міцності 325)	$[\sigma] = 0,9 \times \sigma_{нл} = 0,9 \times 325 \approx 292$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 325$
Сталь – 09Г2С (клас міцності 345)	$[\sigma] = 0,9 \times \sigma_{нл} = 0,9 \times 345 \approx 310$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 345$
Сталь – S355J2 (клас міцності 355)	$[\sigma] = 0,9 \times \sigma_{нл} = 0,9 \times 355 \approx 319$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 355$
Елементи кузова, за винятком хребтової і шворневої балок		
Сталь – Ст3 (клас міцності 245)	$[\sigma] = 0,95 \times \sigma_{нл} = 0,95 \times 245 \approx 232$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 245$
Сталь – 09Г2С (клас міцності 325)	$[\sigma] = 0,95 \times \sigma_{нл} = 0,95 \times 325 \approx 308$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 325$
Сталь – 09Г2С (клас міцності 345)	$[\sigma] = 0,95 \times \sigma_{нл} = 0,95 \times 345 \approx 327$	$[\sigma] = \sigma_{нл} = 345$

Напруження, що допускаються при III-му розрахунковому режимі, необхідно вибирати на підставі границі витривалості елемента, необхідного запасу стійкості форми, зносостійкості конструктивних елементів вагону, з урахуванням ажень, концентрації напружень, впливу корозії тощо.

Допустимі напруження в елементах рами кузова для III-го розрахункового режиму наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3

Допустимі напруження для III режиму

Марка матеріалу, клас міцності	Квазістатична сила, удар, ривок, МПа
Хребтова і шворнева балки рами кузова	
Сталь – 09Г2С (клас міцності 325)	$[\sigma] = 195$
Сталь – 09Г2С (клас міцності 345)	$[\sigma] = 210$

Сталь – <i>S355J2</i> (клас міцності 355)	$[\sigma] = 216$
Елементи кузова, за винятком хребтової і шворневої балок	
Сталь – <i>Ст3</i> (клас міцності 245)	$[\sigma] = 165$
Сталь – <i>09Г2С</i> (клас міцності 325)	$[\sigma] = 205$
Сталь – <i>09Г2С</i> (клас міцності 345)	$[\sigma] = 220$

4. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ НАВАНТАЖЕННЯ

Визначення розрахункових навантажень, а також усі подальші розрахунки проведено для напіввагона моделі 12-783, т.я. згідно технічних характеристик напіввагона (табл.2.1) та вагона для зерна (табл.2.2), вагон для зерна має на 3 тони меншу вантажопідйомність. Крім того, кузов зернового виконує роль несучого елемента конструкції, що значно розвантажує хребтову балку, модернізація якої розглядається в даній роботі.

У розрахунках вантажних вагонів згідно [1] необхідно враховувати такі основні сили:

- власну силу тяжіння конструкції (тари), зокрема предметів і засобів екіпірування та силу тяжіння вантажу;
- інерційні сили, зумовлені коливальними прискореннями мас під час руху вагона по колії з нерівностями;
- сили, що виникають під час руху вагона внаслідок взаємодії вагона й колії в кривих ділянках колії і стрілкових переводах;
- квазістатичні та динамічні сили взаємодії між вагонами, між вагоном і локомотивом, між вагоном і спеціальним шляховим пристроєм (вагоноуповільнювач сортувальної гірки), сили тяги і гальмування, що виникають під час перехідних режимів, поздовжні сили інерції під час маневрових операцій.

Наведені сили зведено в системі координат до таких основних розрахункових груп навантажень:

- вертикальне навантаження;
- бічне навантаження;
- поздовжнє навантаження;
- окремі групи самоврівноважених сил (горизонтальних від розпору сипкими вантажами).

Кузов вагона розраховують на найбільше несприятливе можливе поєднання одночасно діючих незалежно одна від одної наведених сил.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

4.1 Вертикальні сили

Дію сили тяжіння на складову частину вагона враховують, щодо міцності розрахунковими методами, додатком до об'єму прискорення вільного падіння $9,81 \text{ м/с}^2$.

Дію на складову частину вагона сили тяжіння від мас опертих на неї частин (кузова, вантажу тощо) визначають виходячи з максимального осьового навантаження при прискоренні вільного падіння $9,81 \text{ м/с}^2$.

4.1.1 Сила тяжіння бруто кузова

Власну силу тяжіння вагона (тара) визначають:

$$Q_{\text{т.в.}} = g \times m_{\text{тара}},$$

де g – прискорення вільного падіння

$m_{\text{тара}}$ – максимальна розрахункова маса тари вагона, кг.

$$Q_{\text{т.в.}} = 24000 \times 9,81 = 235440 \text{ Н.}$$

Силу тяжіння вантажу визначають:

$$Q_{\text{вант}} = g \times m_{\text{вант}}$$

де $m_{\text{вант}}$ – маса вантажу, кг.

$$Q_{\text{вант}} = 70000 \times 9,81 = 686700 \text{ Н.}$$

Силу тяжіння бруто вагона визначають:

$$Q_{\text{бр.в.}} = Q_{\text{т.в.}} + Q_{\text{вант}} = 235440 + 686700 = 922140 \text{ Н.}$$

Силу тяжіння бруто кузова визначають:

$$Q_{\text{бр.куз}} = Q_{\text{бр.в.}} - g \times (m_{\text{віз1}} + m_{\text{віз2}}),$$

де $m_{\text{віз1}} = 4811 \text{ кг}$ – маса першого візка тип 2 згідно з ДСТУ 530-2014;

$m_{\text{віз2}} = 4827 \text{ кг}$ – маса другого візка тип 2 згідно з ДСТУ 7530-2014.

$$Q_{\text{бр.куз}} = 922140 - 9,81 \times (4811 + 4827) = 827591,22 \text{ Н.}$$

Силу тяжіння бруто кузова необхідну для розрахунку динамічного навантаження визначають:

$$Q_{\text{бр}} = Q_{\text{бр.куз}} + g \times \left(2 \times m_{\text{надр}} + 8 \times m_{\text{клин}} + \frac{1}{3} \times 2 \times m_{\text{рес}} \right),$$

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

де $m_{надр}=585$ кг – маса надресорної балки;

$m_{клин}=16$ кг – маса клина;

$m_{рес}=315$ кг – маса ресорного комплексу візка.

$$Q_{бр} = 827591,22 + 9,81 \times \left(2 \times 585 + 8 \times 16 + \frac{1}{3} \times 2 \times 315 \right) = 842384,7 \text{ Н.}$$

4.1.2 Вертикальна добавка від поздовжньої сили інерції кузова

При використанні розрахункових методів вертикальну складову (добавку) сили інерції P_z , що діє на складову частину вагона від опертих на неї частин або вантажу, визначають:

$$P_z = F_{ин} \times \frac{h_k}{2l},$$

де $F_{ин}$ – поздовжня сила інерції кузова брутто, Н;

h_k – відстань від центра ваги кузова до осі автозчепу, м;

$2l=8,65$ м – база вагона.

Поздовжні сили інерції окремих мас вагона $F_{ин}$ в загальному випадку визначають:

$$F_{ин} = F_x \times \frac{m}{m_{ваг}},$$

де F_x – зовнішня поздовжня сила удару або ривка, прикладена до автозчепу (таблиця 5.1 [1]), Н;

m – маса вузла, деталі, вантажу, для якої визначають поздовжню силу інерції, кг;

$m_{ваг}=94000$ кг – загальна маса вагона.

Відстань від центра ваги кузова до осі автозчепу визначають:

$$h_k = h_{куз} - h_{авт},$$

де $h_{куз}=2,266$ м – висота центра ваги кузова від рівня верха головок рейок;

$h_{авт}=1,021$ м – висота осі автозчепу кузова від рівня верха головок рейок.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Торцеві стіни кузова потрібно розраховувати на рівномірно розподілений по всій їхній площі динамічний тиск насипного вантажу, що виникає під час співудару вагонів від дії сили інерції маси вантажу, що дорівнює 0,35 вантажопідйомності вагона.

Поздовжня сила інерції:

Режим I (удар)

– сила інерції першого візка

$$N_{in.viz1} = 3500000 \times \frac{4811}{94000} = 179132,979 \text{ H};$$

– сила інерції другого візка

$$N_{in.viz2} = 3500000 \times \frac{4827}{94000} = 179728,723 \text{ H};$$

– сила інерції кузова

$$N_{in.kuz} = 3500000 \times \frac{14362}{94000} = 534755,319 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу

$$N_{in.vant} = 3500000 \times \frac{70000}{94000} = 2606382,979 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу, що діє на торцеву стіну

$$N_{in.vant}^{тор.ст} = 0,35 \times 2606382,979 = 912234,043 \text{ H}.$$

Режим II (ривок)

– сила інерції першого візка

$$N_{in.viz1} = 2500000 \times \frac{4811}{94000} = 127952,128 \text{ H};$$

– сила інерції другого візка

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$N_{in.віз2} = 2500000 \times \frac{4827}{94000} = 128377,66 \text{ H};$$

– сила інерції кузова

$$N_{in.куз} = 2500000 \times \frac{14362}{94000} = 381968,085 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу

$$N_{in.вант} = 2500000 \times \frac{70000}{94000} = 1861702,128 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу, що діє на торцеву стіну

$$N_{in.вант}^{тор.ст} = 0,35 \times 1861702,128 = 651595,745 \text{ H}.$$

Режим III (удар, ривок)

– сила інерції першого візка

$$N_{in.віз1} = 1000000 \times \frac{4811}{94000} = 51180,851 \text{ H};$$

– сила інерції другого візка

$$N_{in.віз2} = 1000000 \times \frac{4827}{94000} = 51351,064 \text{ H};$$

– сила інерції кузова

$$N_{in.куз} = 1000000 \times \frac{14362}{94000} = 152787,234 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу

$$N_{in.вант} = 1000000 \times \frac{70000}{94000} = 744680,851 \text{ H};$$

– сила інерції вантажу, що діє на торцеву стіну

$$N_{in.вант}^{тор.ст} = 0,35 \times 744680,851 = 260638,298 \text{ H}.$$

Вертикальна добавка від поздовжньої сили інерції кузова:

– режим I (удар)

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$P_z = 3141138,298 \times \frac{2,266 - 1,021}{8,65} = 452106,032 \text{ Н};$$

– режим II (ривок)

$$P_z = 2243670,213 \times \frac{2,266 - 1,021}{8,65} = 322932,88 \text{ Н};$$

– режим III (удар, ривок)

$$P_z = 897468,085 \times \frac{2,266 - 1,021}{8,65} = 129173,152 \text{ Н}.$$

Згідно з п. 5.6 (таблиця 5.3, [1]), вертикальна добавка від поздовжньої сили інерції кузова P_z , у разі підсумовування з іншими навантаженнями за I режимом враховують у розмірі 50%; у разі підсумовування лише із силою тяжіння бруто враховують у розмірі 100%.

4.1.3 Вертикальне динамічне навантаження

Значення вертикального динамічного навантаження на елементи вагона від коливань під час руху в складі потяга визначають множенням сили тяжіння бруто, що діє на розрахунковий вузол, на коефіцієнт вертикальної динаміки [9]:

$$Q_{дин} = k_{ДВ} \times Q_{бр}.$$

Коефіцієнт вертикальної динаміки $k_{ДВ}$ визначають:

$$k_{ДВ} = \frac{\bar{k}_{ДВ}}{\omega} \times \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \ln \frac{1}{1 - P(k_{ДВ})}},$$

де $\bar{k}_{ДВ}$ – середнє ймовірне значення коефіцієнта вертикальної динаміки;

ω – параметр розподілу, приймають для завантажених вагонів $\omega = 1,13$;

$P(k_{ДВ})$ – розрахункова одностороня ймовірність, приймають $P(k_{ДВ}) = 0,97$.

Середнє ймовірне значення коефіцієнта вертикальної динаміки

визначають:

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$\bar{k}_{дв} = A + 3,6 \times 10^{-4} \times B \times \frac{V - 15}{f_{ст}},$$

де A – коефіцієнт, що дорівнює для елементів кузова – $0,05$;

B – коефіцієнт, що враховує вплив кількості осей n у візку або групі візків під одним кінцем екіпажу:

$$B = \frac{n + 2}{2 \times n} = \frac{2 + 2}{2 \times 2} = 1;$$

V – розрахункова (конструкційна) швидкість, $м/с$;

$f_{ст}$ – статичний прогин ресорної підвіски, $м$:

$$f_{ст} = \frac{Q_{бр}}{2 \times C_в},$$

де $Q_{бр}$ – сила тяжіння бруто кузова, $Н$;

$C_в = 8,848 \text{ МН/м}$ – вертикальна жорсткість ресорного комплекту візка.

$$f_{ст} = \frac{842384,7}{2 \times 8,848 \times 10^6} = 0,048 \text{ м};$$

$$\bar{k}_{дв} = 0,05 + 3,6 \times 10^{-4} \times 1 \times \frac{33,33 - 15}{0,048} = 0,187;$$

$$k_{дв} = \frac{0,187}{1,13} \times \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \ln \frac{1}{1 - 0,97}} = 0,3497;$$

$$Q_{дин} = 0,3497 \times 842384,7 = 294556,899 \text{ Н}.$$

Для шворневих (опорних) вузлів рами і шворневих стояків (у місцях з'єднання з рамою) бічних стінок кузова вантажного вагона значення розрахункового коефіцієнта вертикальної динаміки визначають з урахуванням впливу перевалювання кузова вагона за формулою:

$$k_{дв}^P = k_{дв} \times (1 + \xi),$$

де $k_{дв}$ – коефіцієнт вертикальної динаміки;

ξ – коефіцієнт, що рекомендовано приймати $\xi = 0,2$.

$$k_{дв}^P = 0,3497 \times (1 + 0,2) = 0,4196.$$

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

4.2 Поздовжні сили

До основних розрахункових поздовжніх навантажень належать сили стискання і розтягування (квазістатичні та динамічні) під час взаємодії вагонів із локомотивом і поміж собою в складі потяга, обумовлені дією сил тяги і гальмування, а також сили аеродинамічного опору, що виникають під час перехідних і сталих режимів руху потяга, у режимах транспортування їх та в особливих ситуаціях.

Встановлені наступні значення та розрахункові схеми поздовжніх сил за I режимом:

а) сила 3,5 МН – сила удару, прикладена до заднього упору автотзепу одного кінця вагона на прямій ділянці колії в разі різниці висот автотзепів взаємодіючих вагонів 0,1 м і врівноважені силами інерції маси вагона (візків, кузова, вантажу тощо);

б) сила 2,5 МН – сила ривка, прикладена до переднього упора автотзепу одного кінця вагона на прямій ділянці колії в разі різниці висот автотзепів взаємодіючих вагонів 0,1 м і врівноважені силами інерції маси вагона (візків, кузова, вантажу тощо);

в) сила 2,5 МН – квазістатична сила, що стискає, прикладена до задніх упорів обох кінців вагона на рівні осі автотзепного обладнання, у разі нецентральної взаємодії двох сусідніх вагонів із різницею висот осей автотзепів 0,1 м;

г) сила 2,0 МН – квазістатична сила, що розтягує, прикладена до передніх упорів обох кінців вагона на рівні осі автотзепного обладнання, у разі нецентральної взаємодії двох сусідніх вагонів із різницею висот осей автотзепів 0,1 м.

Встановлені наступні значення та розрахункові схеми поздовжніх сил за III режимом:

а) сила 1,0 МН – сила удару, прикладена до заднього упора автотзепу одного кінця вагона на прямій ділянці колії в разі різниці висот автотзепів

					ДІП.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

взаємодіючих вагонів 0,05 м і врівноважені силами інерції маси вагона (візків, кузова, вантажу тощо);

б) сила 1,0 МН – сила ривка, прикладена до переднього упора автозчепу одного кінця вагона на прямій ділянці колії в разі різниці висот автозчепів взаємодіючих вагонів 0,05 м і врівноважені силами інерції маси вагона (візків, кузова, вантажу тощо);

в) сила 1,0 МН – квазістатична сила, що стискає, прикладена до задніх упорів обох кінців вагона на рівні осі автозчепного обладнання, у разі нецентральної взаємодії двох сусідніх вагонів із різницею висот осей автозчепів 0,05 м;

г) сила 1,0 МН – квазістатична сила, що розтягує, прикладена до передніх упорів обох кінців вагона на рівні осі автозчепного обладнання, у разі нецентральної взаємодії двох сусідніх вагонів із різницею висот осей автозчепів 0,05 м.

Конструктивний ексцентриситет (по висоті) поздовжньої осі автозчепу відносно центра ваги перерізу хребтової балки рами вагона враховується автоматично програмними засобами.

4.3 Сили в разі нецентральної взаємодії автозчепів двох вагонів

У разі нецентральної взаємодії автозчепів двох вагонів на консолі їхніх кузовів додатково діють вертикальні сили, які визначають:

$$P = \pm F \times \frac{e}{b},$$

де F – розрахункова поздовжня сила відповідно до таблиці 5.1 [1], H ;

e – різниця рівнів осей зчеплених автозчепів, m . Приймають $e=0,1 m$ за I режимом, $e=0,05 m$ за III режимом;

b – довжина жорсткого стрижня, утвореного двома зчепленими автозчепами по умовних шарнірах у точках опори на вагони, m . Для автозчепу СА-3 приймають $b=2,0 m$ – стискання (удар); $b=1,81 m$ – розтягування (ривок).

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Режим I а

$$P = \pm 3,5 \times 10^6 \times \frac{0,1}{2,0} = \pm 175000 \text{ Н.}$$

Режим I б

$$P = \pm 2,5 \times 10^6 \times \frac{0,1}{1,81} = \pm 138121,547 \text{ Н.}$$

Режим I в

$$P = \pm 2,5 \times 10^6 \times \frac{0,1}{2,0} = \pm 125000 \text{ Н.}$$

Режим I г

$$P = \pm 2,0 \times 10^6 \times \frac{0,1}{1,81} = \pm 110497,238 \text{ Н.}$$

Режим III а, в

$$P = \pm 1,0 \times 10^6 \times \frac{0,05}{2,0} = \pm 25000 \text{ Н.}$$

Режим III б, г

$$P = \pm 1,0 \times 10^6 \times \frac{0,05}{1,81} = \pm 27624,309 \text{ Н.}$$

Відстань a до точки прикладання вертикальної сили P від площини лобового бруса визначають:

$$a = \frac{b}{2} - c \pm h,$$

де $c = 0,61 \text{ м}$ – конструктивний виліт автозчепу за площину кінцевого бруса;

$h = \pm 0,11 \text{ м}$ – повний хід поглинального апарата (знак «+» – у разі стискання,

«-» – у разі розтягування).

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

У разі стискання

$$a = \frac{2,0}{2} - 0,61 + 0,11 = 0,5 \text{ м.}$$

У разі розтягування

$$a = \frac{1,81}{2} - 0,61 - 0,11 = 0,185 \text{ м.}$$

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

5. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

5.1 Розрахункова схема

Скінчено-елементна 3-Д модель конструкції кузова напіввагона моделі 12-783 побудована з використанням стержньових та пластинчастих скінчених елементів. Загальний вигляд моделі вагона наведено на рис. 5.1.

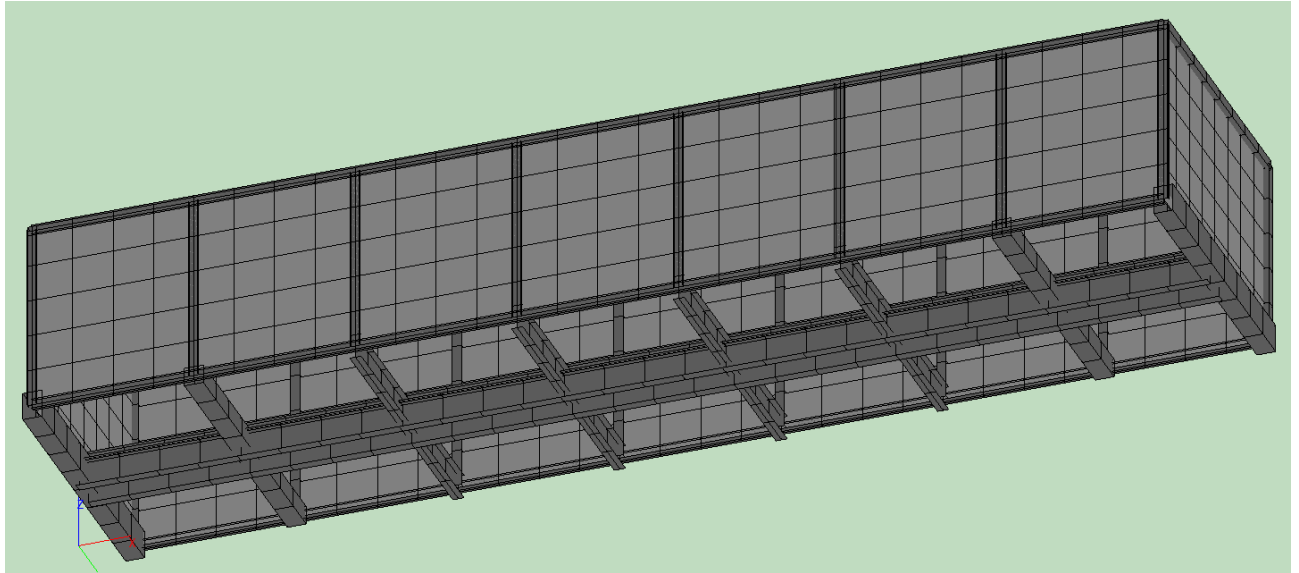


Рис. 5.1. Скінчено-елементна модель кузова напіввагона моделі 12-783

На конструктивне виконання рами рис. 5.2 показане кузова з модернізованою хребтовою балкою.

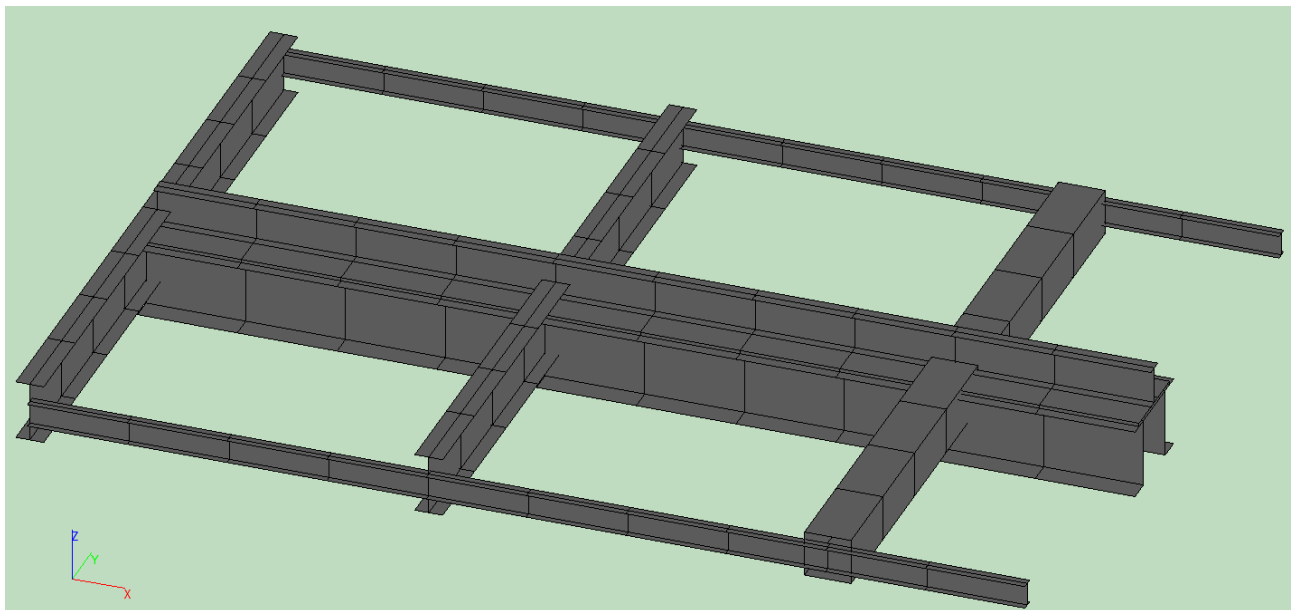


Рис. 5.2. Рама кузова напіввагона з модернізованою хребтовою балкою.

Сітка кінцевих елементів (СКЕ) має наступні характеристики:

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- кількість елементів – 660;
- кількість вузлів – 495;
- порядок системи рівнянь-2597

5.2 Результати розрахунків за I-м розрахунковим режимом

Поєднання повздовжніх та вертикальних сил, які відповідають I-му розрахунковому режиму наведено п. 4.2

5.2.1 Розрахунковий режим 1а.

Розрахунковий режим 1а відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто, стискаючого навантаження 3.5 МН та повздовжніх сил інерції.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі 1а для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.3-5.4

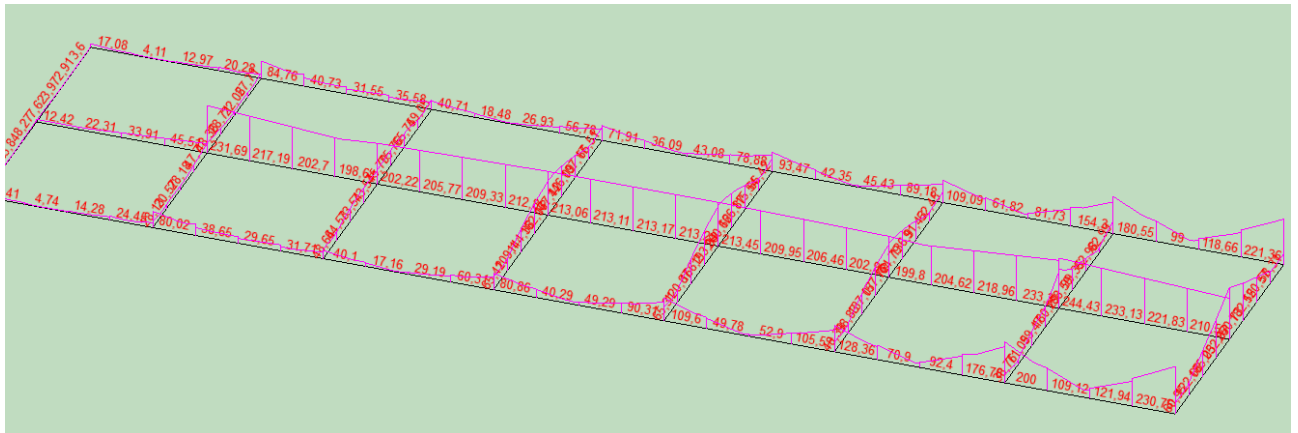
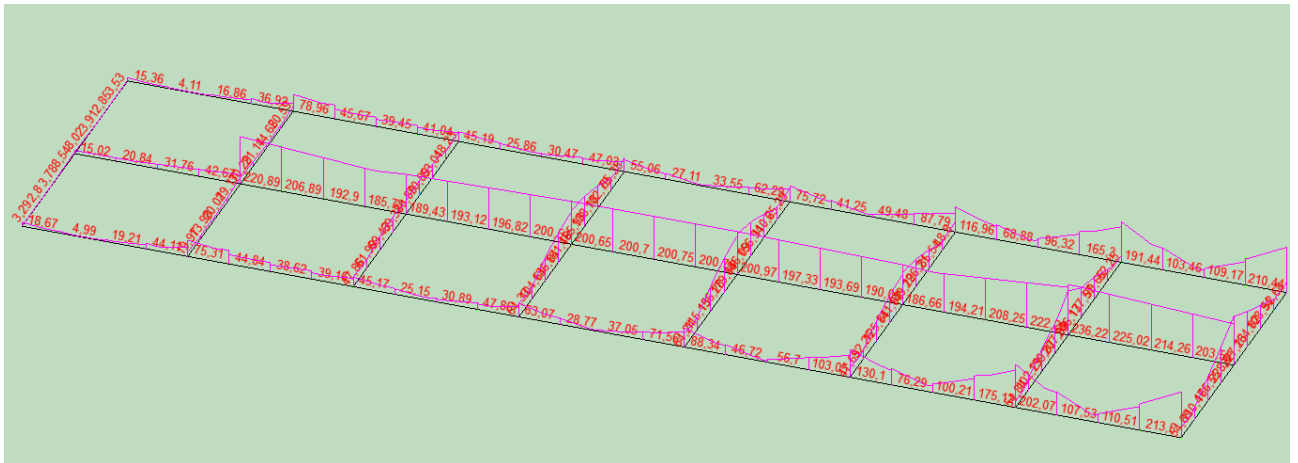


Рис 5.3. Напружений стан базової конструкції (режим 1а)



5.4. Напружений стан модернізованої конструкції (режим 1а)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДІТ.300000.612.КРПЗ

Арк

34

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом Іа

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	319	244	236
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	310	188	206
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	327	200	186
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	327	230	220

5.2.2 Розрахунковий режим Іб.

Розрахунковий режим Іа відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто, розтягуючого навантаження 2.5 МН та повздовжніх сил інерції.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі Іб для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.5-5.6

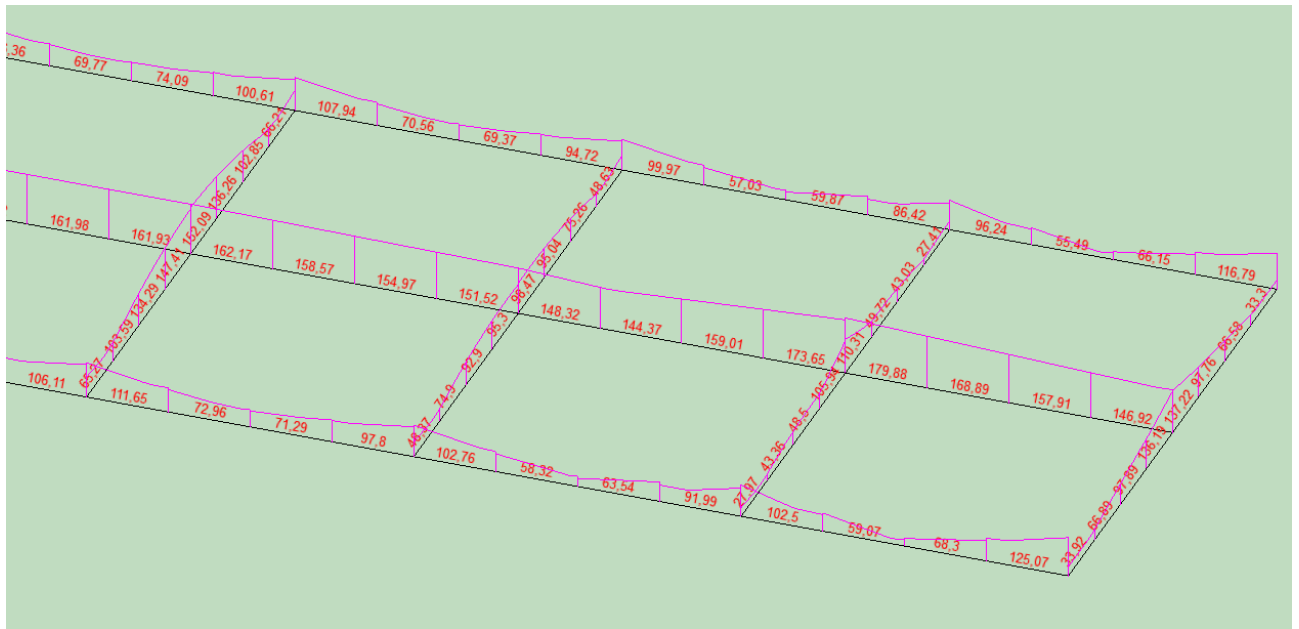
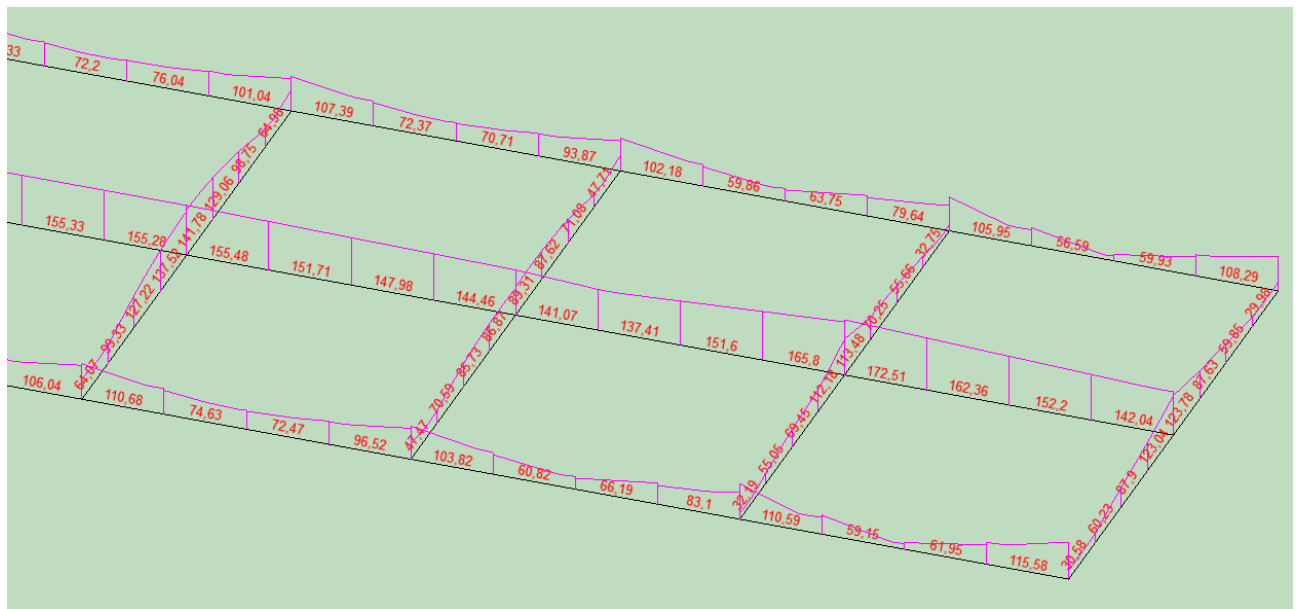


Рис 5.5. Напружений стан базової конструкції (режим 16)



5.6. Напружений стан модернізованої конструкції (режим 16)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом Іб

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий	Модерн.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

ДІТ.300000.612.КРПЗ

Арк

36

				варіант	варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	319	180	172
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	310	110	113
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	327	152	138
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	327	136	123

5.2.3 Розрахунковий режим 1в.

Розрахунковий режим 1а відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто та стискаючого навантаження 2.5 МН.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі Ів для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.7-5.8

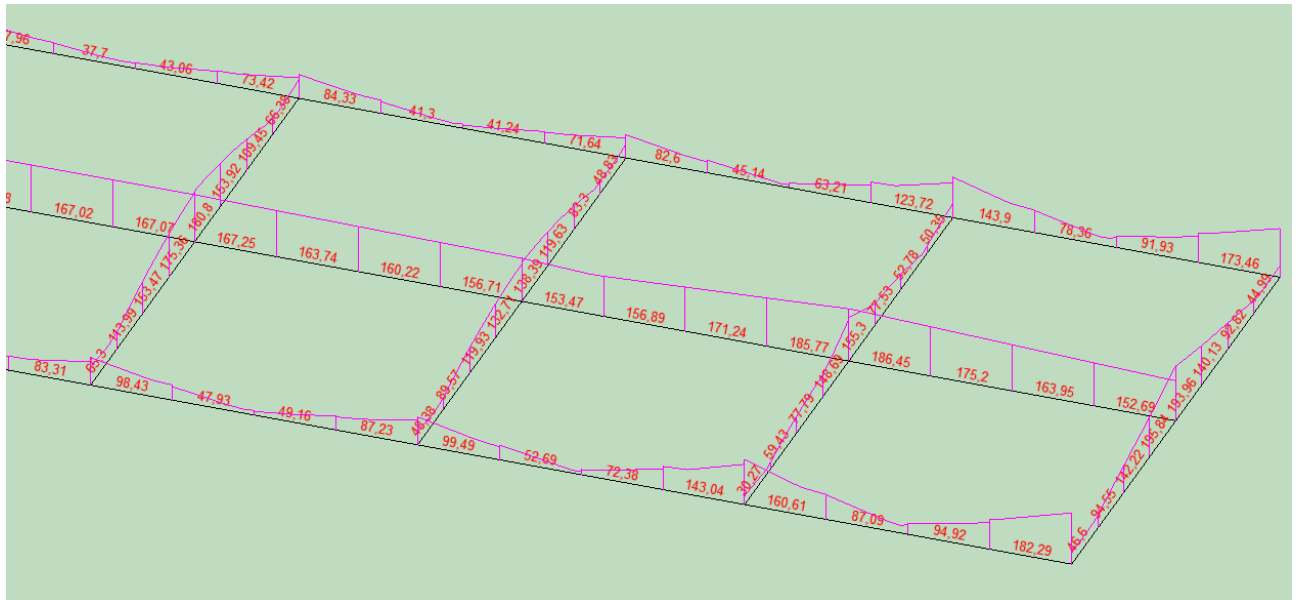
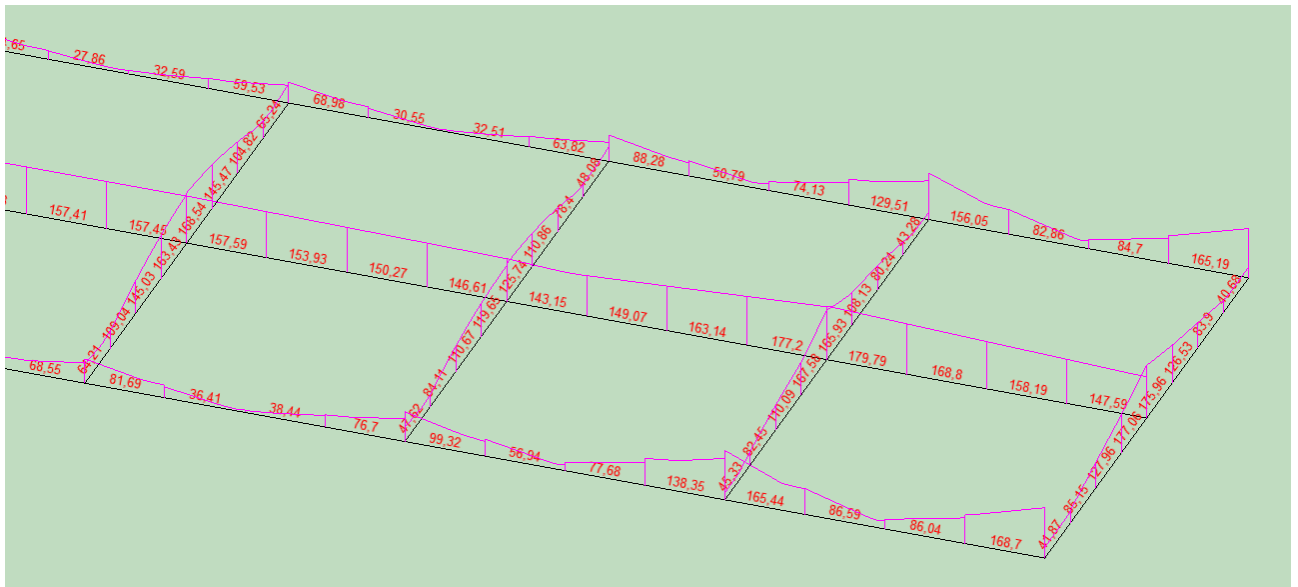


Рис 5.7. Напружений стан базової конструкції (режим 1в)



5.8. Напружений стан модернізованої конструкції (режим 1в)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом Ів

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	319	186	180
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	310	155	167
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	327	175	163
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	327	195	171

5.2.4 Розрахунковий режим 1г.

Розрахунковий режим 1г відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто, розтягуючого навантаження 2 МН.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі 1г для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.9-5.10

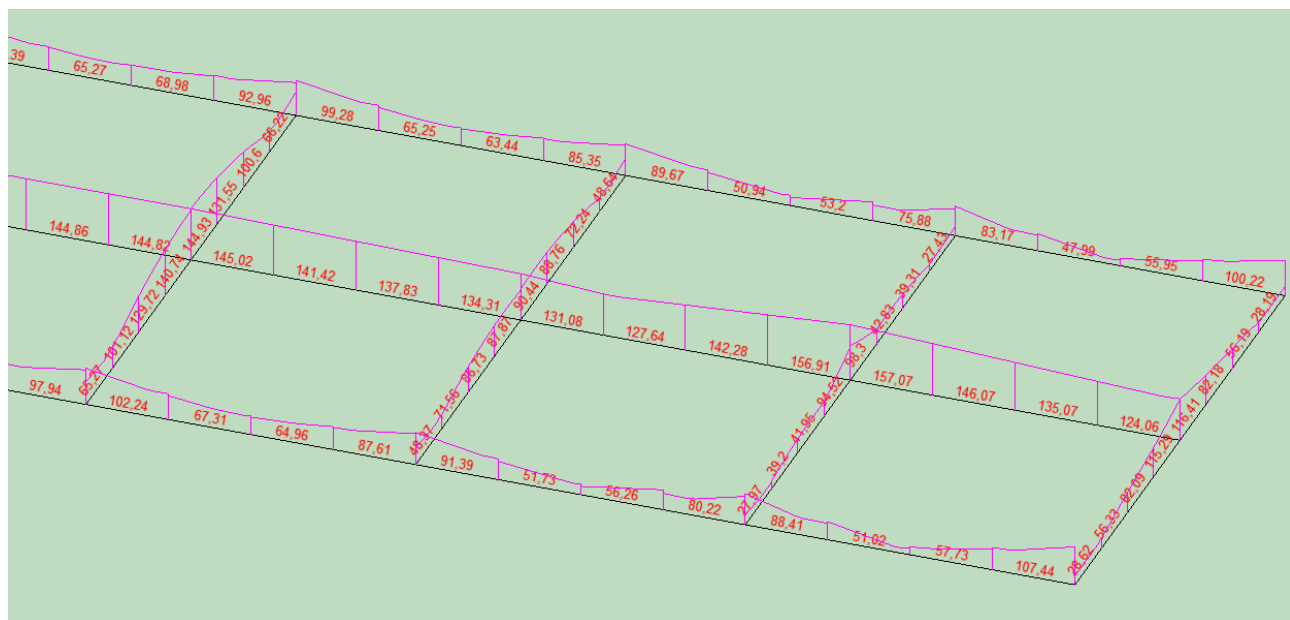


Рис 5.9. Напружений стан базової конструкції (режим 1г)



5.10. Напружений стан модернізованої конструкції (режим 1г)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.4.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом Іг

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	319	157	150
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	310	94	97
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	327	144	131
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	327	115	104

5.3 Результати розрахунків за III-м розрахунковим режимом

5.3.1 Розрахунковий режим IIIа.

Розрахунковий режим IIIа відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто (з урахуванням коефіцієнта динаміки), стискаючого навантаження 1 МН та повздовжніх сил інерції.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі IIIа для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.11-5.12

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

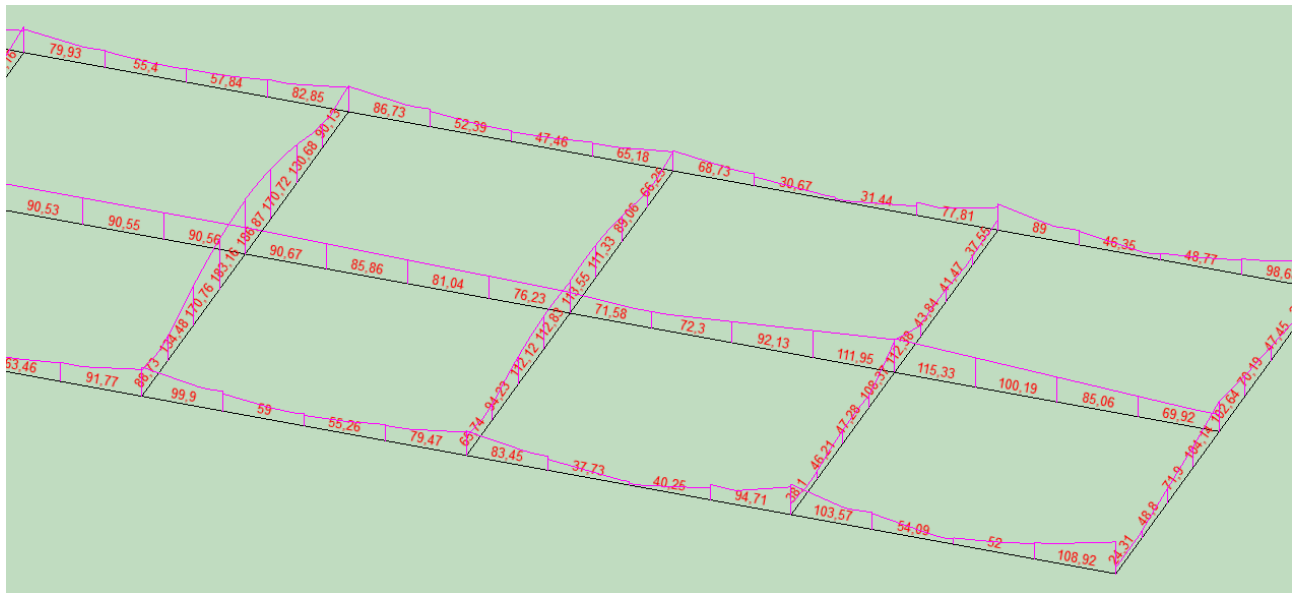
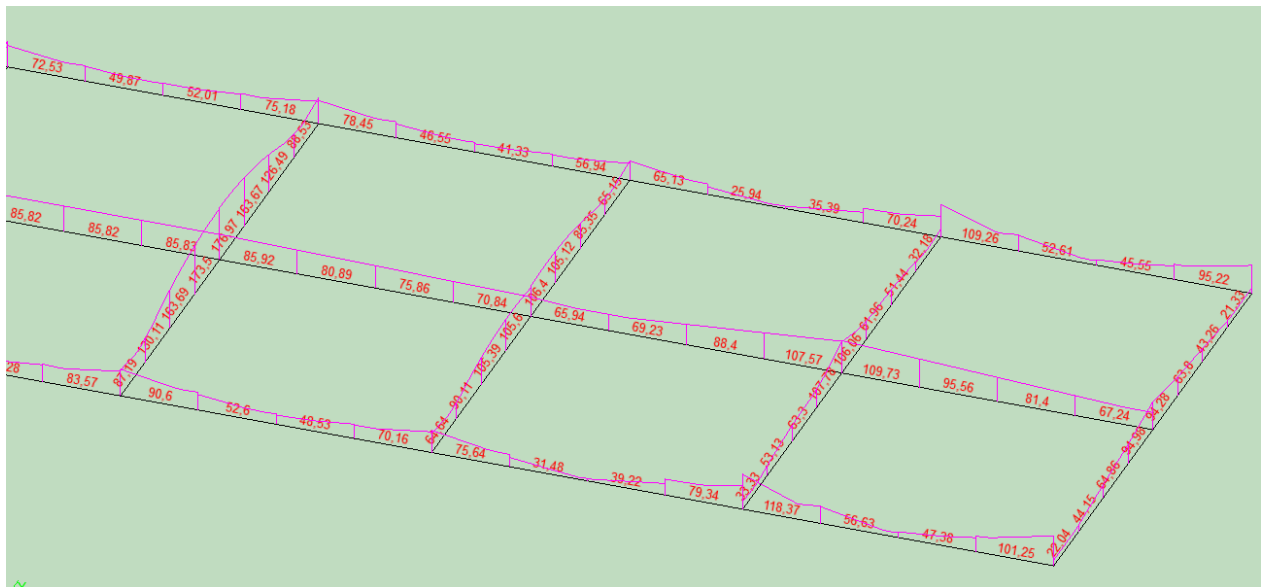


Рис 5.11. Напружений стан базової конструкції (режим III)



5.12. Напружений стан модернізованої конструкції (режим III)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом III

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДІТ.300000.612.КРПЗ

Арк

41

1	Хребтова балка:				
	- консольна зона	S355J2	216	244	236
	- середина вагона		216	213	201
	- зона шворневої балки		216	233	223
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	195	188	206
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	210	200	186
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	210	230	220

5.3.2 Розрахунковий режим ШБ.

Розрахунковий режим ШБ відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова брутто (з урахуванням коефіцієнта динаміки), розтягуючого навантаження 1 МН та повздовжніх сил інерції.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі ШБ для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.13-5.14

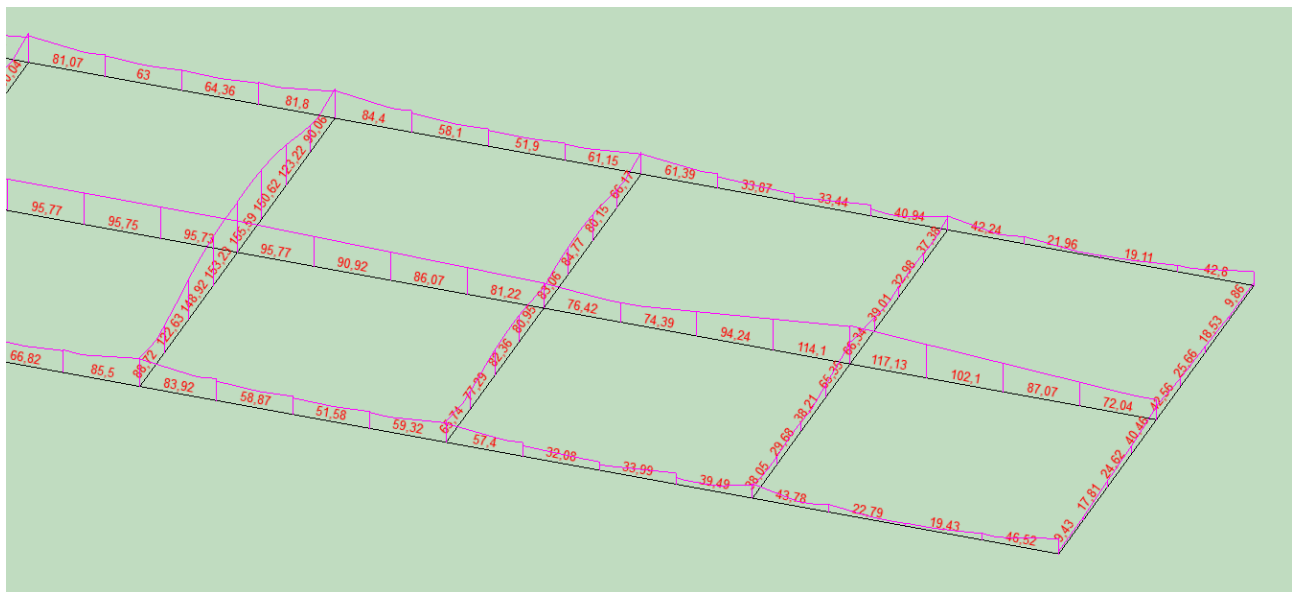
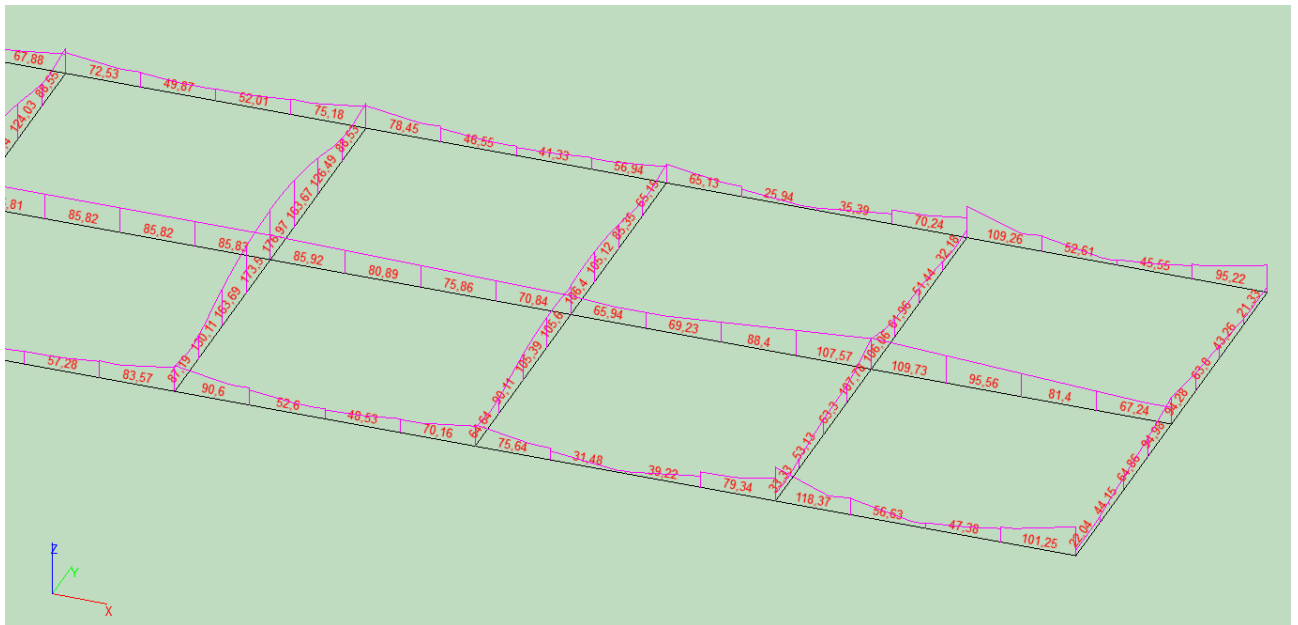


Рис 5.13. Напружений стан базової конструкції (режим ШБ)



5.14. Напружений стан модернізованої конструкції (режим ІІБ)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом ІІБ

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	216	180	172
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	195	110	113
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	210	152	138
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	210	136	123

5.3.3 Розрахунковий режим Шв.

Розрахунковий режим Шв відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова бруто (з урахуванням коефіцієнта динаміки) та стискаючого навантаження 1 МН.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі Шв для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.15-5.16

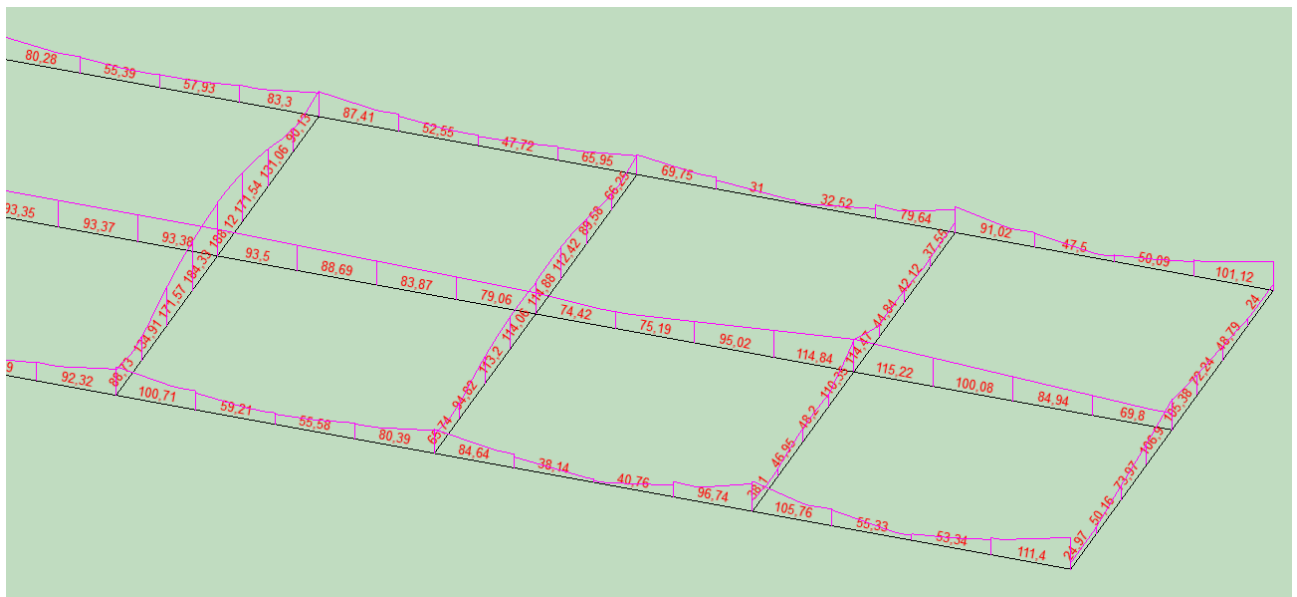
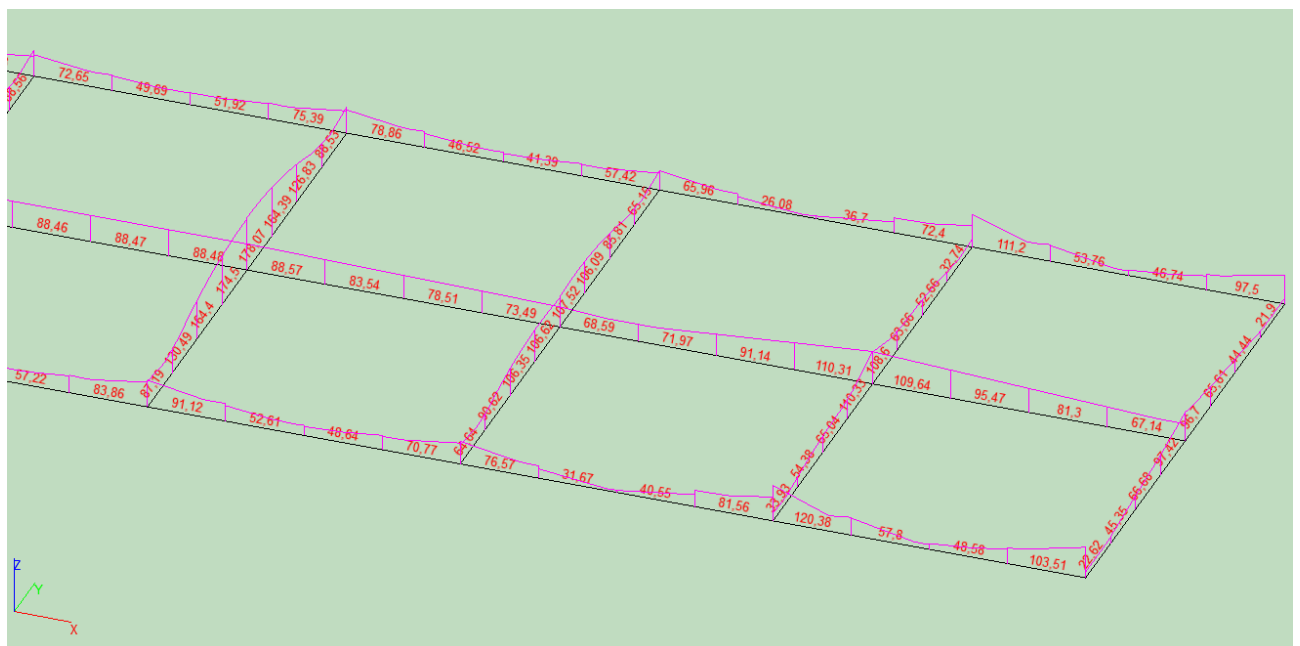


Рис 5.15. Напружений стан базової конструкції (режим Шв)



5.16. Напружений стан модернізованої конструкції (режим Шв)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДІТ.300000.612.КРПЗ

Арк

44

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом Шв

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2	216	115	109
	- консольна зона				
	- середина вагона				
	- зона шворневої балки				
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	195	110	110
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	210	184	175
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	210	107	91

5.3.4 Розрахунковий режим ШГ.

Розрахунковий режим ШГ відповідає сумісній дії вертикальних сил тяжіння від ваги кузова бруто (з урахуванням коефіцієнта динаміки), розтягуючого навантаження 1 МН.

Напружений стан металоконструкції кузова при дії навантажень в режимі ШГ для двох варіантів виконання хребтової балки (базового та модернізованого) показано на рисунках 5.17-5.118

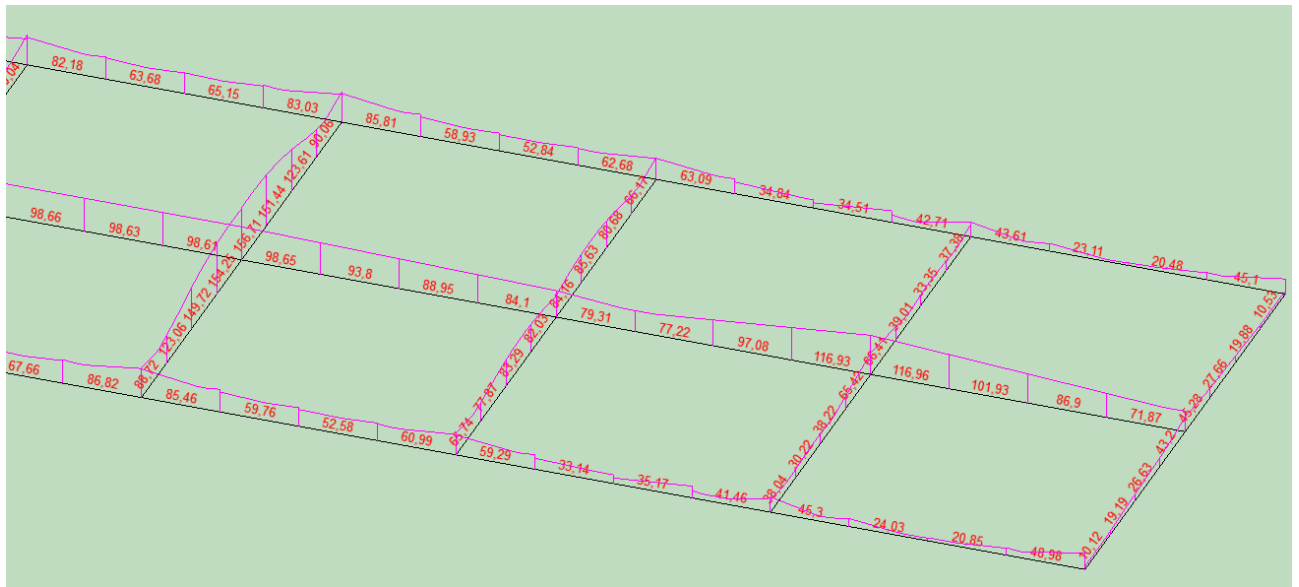
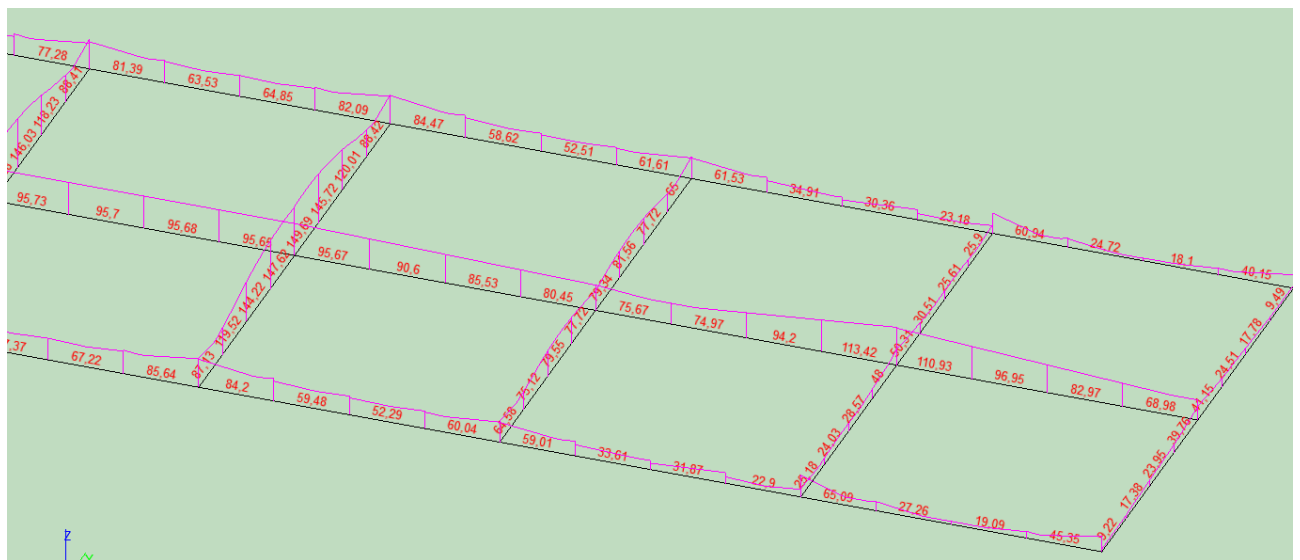


Рис 5.17. Напружений стан базової конструкції (режим IIIr)



5.18. Напружений стан модернізованої конструкції (режим IIIr)

Еквівалентні напруження, отримані в результаті розрахунку, представлені в порівняльній таблиці 5.8.

Таблиця 5.8

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під час дії навантаження за режимом IIIr

№ п/п	Елемент конструкції	Матеріал	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, МПа	
				Базовий варіант	Модерн. варіант

1	2	4	5	6	
1	Хребтова балка:	S355J2			
	- консольна зона		216	117	111
	- середина вагона		216	99	96
	- зона шворневої балки		216	117	113
2	Шворнева балка:	325-09Г2С	195	65	50
3	Поперечна балка:	345-09Г2С	210	154	148
4	Кінцева балка:	345-09Г2С	210	43	40

5.4 Перевірка міцності кузова на опір втомі

У відповідності до вимог п.6.2.5 ДСТУ 7598:2014 міцність конструкції на опір втомі забезпечена, якщо коефіцієнт запасу опору втомі n відповідає умові:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n],$$

де $\sigma_{a,N}$ – границя витривалості (за амплітудою) натурної деталі у разі симетричного циклу і сталого режиму навантаження на базі випробувань N_0 . Для корпусних несучих деталей вагонів базу випробувань приймають, як правило, рівною $N_0 = 10^7$ циклів;

$\sigma_{a,e}$ – розрахункове значення амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, приведена до бази N_0 , еквівалентне за ушкоджувальною дією реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень протягом проектного терміну служби деталі;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі. Згідно ДСТУ 7598:2014 (варіант В таблиці 6.6) прийнято $[n]=1,8$.

Границя витривалості натурної деталі у разі симетричного циклу визначалася за формулою:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{(K_{\sigma})_k},$$

										Арк
										47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДІТ.300000.612.КРПЗ					

де $\overline{\sigma_{-1}}$ – середнє (медіанне) значення границі витривалості гладкого стандартного зразка з матеріалу деталі визначалося за додатком Ж ДСТУ 7598:2014. Для сталі з класом міцності 325 $\overline{\sigma_{-1}} = 210$ МПа, з класом міцності 345 $\overline{\sigma_{-1}} = 220$ МПа;

$(\overline{K_{\sigma}})_k$ – середнє значення коефіцієнта зниження границі витривалості даної натурної деталі відносно границі витривалості гладкого стандартного зразка:

$$(\overline{K_{\sigma}})_k = \overline{K_{\sigma}} \cdot \frac{K_H \cdot K_{3M}}{K_M \cdot K_{ПОВ}}$$

де $\overline{K_{\sigma}}$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, що враховує зниження опору втомі в зв'язку з місцевими змінами форми і розмірів деталі. Так як, тензодатчики розташовані безпосередньо в місцях концентрації напружень, прийнято. $\overline{K_{\sigma}} = 1$

K_H – коефіцієнт неоднорідності матеріалу. Для сталевого прокату, поковок і гарячих штамповок $K_H = 1,2$;

K_{3M} – коефіцієнт впливу поверхневої зміцнювальної обробки деталей. У разі відсутності оброблення $K_{3M} = 1,0$;

K_M – коефіцієнт впливу розмірів деталі (масштабного чинника), для деталей із характерними розмірами поперечного перерізу (діаметр, висота, діагональ) більше 300 мм $K_M = 0,75$;

$K_{ПОВ}$ – коефіцієнт впливу якості поверхні деталі, рекомендовано приймати рівним, для чорної поверхні після прокатування $K_{ПОВ} = 0,85$.

В результаті:

$$(\overline{K_{\sigma}})_k = 1 \frac{1,2 \cdot 1}{0,75 \cdot 0,85} = 1,88$$

Розрахункове значення амплітуди динамічного напруження:

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$\sigma_{a,e} = m \sqrt{\frac{N_c}{N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i}$$

де m – показник ступеня в рівнянні кривої втоми;

N_c – сумарне число циклів динамічних напружень за розрахунковий термін служби;

N_0 – базове число циклів, рекомендовано для сталевих конструкцій (крім колісних пар) приймати $N_0 = 10^7$;

σ_{ai} – рівень (розряд) амплітуди напружень (динамічні добавки напружень);

P_i – імовірність появи амплітуди з рівнем σ_{ai} .

Показник ступеня в рівнянні кривої втоми визначався за формулою:

$$m = \frac{A}{(K_{\sigma})_k}$$

де $A = 18$ – для низьколегованих сталей.

Таким чином:

$$m = \frac{18}{1,88} = 9,57$$

Але приймаючи до уваги те, що оцінка міцності на втому проводиться по верхній границі, прийнято $m=4$ (для зварних конструкцій із прокату без зміцнювального оброблення швів).

Динамічні добавки напружень σ_{ai} визначаються по результатам розрахунків на міцність при дії вертикального статичного для модернізованого та базового варіантів вагону моделі 12-783 та теоретичного значення коефіцієнта динаміки, а саме:

$$\sigma_{ai} = K_{di} * \sigma_{cm}$$

де K_{di} - коефіцієнт динаміки під час руху на швидкості V_i , $K_{di} = 0.35$ (дивись п 3.1.3)

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

σ_{cm} – напруження від дії вертикального статичного навантаження (вага конструкції + вага вантажу) наведені в таблиці 5.9

Таблиця 5.9.

Напруження, що виникають в металоконструкції кузова вагона під дії вертикального статичного навантаження

№ п/п	Елемент конструкції	Еквівалентні напруження, МПа	
		Базовий варіант	Модерн. варіант
1	2	6	
1	Хребтова балка:		
	- консольна зона	44	42
	- середина вагона	30	30
	- зона шворневої балки	45	44
2	Шворнева балка:	53	45
3	Поперечна балка:	119	114
4	Кінцева балка:	29	27

Сумарне число циклів динамічних напружень за розрахунковий термін служби:

$$N_c = f_e \cdot T_p$$

де f_e – центральна (ефективна) частота процесу зміни динамічних напружень, Гц;

T_p – сумарний час дії динамічних напружень під час руху за розрахунковий термін служби деталі (вузла), с.

Центральна (ефективну) частота процесу в Герцах визначалася за формулою:

$$f_e = \frac{a}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{f_{cm}}},$$

де a – коефіцієнт, який для елементів кузова дорівнює 1,4;

g – прискорення вільного падіння, м/с²; $g = 9,81$ м/с²;

f_{cm} – статичний прогин ресорного підвішування. За даними конструкторської документації $f_{cm} = 0,048$ м.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$f_e = \frac{1,4}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{9,81}{0,048}} = 3,19 \text{Гц}$$

Сумарний час дії динамічних напружень під час руху за розрахунковий термін служби:

$$T_p = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \bar{L}_c}{\bar{v}} T_k,$$

\bar{L}_c – проектний середньодобовий пробіг вагона, км/добу. При проведенні розрахунків приймалося $\bar{L}_c = 192$ км/добу

\bar{v} – середня технічна швидкість руху вагона, м/с. Згідно з таблицею 6.4 для вагонів даного типу $\bar{v} = 22,4$ м/с;

T_k – проектний (розрахунковий) календарний термін служби вагона приймався рівним - 22 рокам.

Розрахунки коефіцієнту запасу опору втомі для базового варіанту конструкції хребтової балки та модернізованого проведені з використанням програми EXEL.

За результатами розрахунків на опір втомі можна зробити наступні висновки:

- для усіх конструктивних елементів рами вагона моделі 12-783 коефіцієнт запасу на опір втомі більше допустимого значення 1.8, як для базового варіанту виконання хребтової балки, так і модернізованого;
- Мінімальний коефіцієнт запасу опору втомі для елементів хребтової балки має місце в її передній частині в районі з'єднання з шкворневою балкою і складає 2.4 для базового варіанту виконання хребтової балки та 2.7 для модернізованого.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

На основі аналізу результатів отриманих в роботі можна зробити наступні висновки:

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

1. Проведено аналіз причин значного скорочення в Україні парку вантажних вагонів, та запропоновано шляхи відновлення їх виробництва.
2. Проведено аналіз конструкцій напіввагона моделі 12-783 та вагону бункерного типу для перевезення зерна моделі 19-765 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук) та запропоновано варіант зміни конструкції шкворневої балки, а саме запропоновано замінити в конструкції хребтових балок прокатні профілі у вигляді зета (раніше поставлявся з країни агресора) на інший прокатний профіль, який масово виготовляється Українськими металургійними заводами.
3. Обрано метод проведення досліджень та побудовано скінчено-елементну модель кузова напіввагона моделі 12-783.
4. Визначені розрахункові навантаження у відповідності до вимог нормативних документів, які діють в Україні, та проведено розрахунки на міцність базової та модернізованої конструкції кузова напіввагона моделі 12-783.
5. На основі результатів розрахунків встановлено, що напруження в елементах базової рами напіввагона моделі 12-783 з модернізованою хребтовою балкою та базовому варіанті її виконання при дії навантажень, які відповідають I-му та III-му розрахунковим режимам, не перевищують допустимих значень та відповідають вимогам ДСТУ 7598:2014.
6. У разі відсутності зетового прокатного профілю № 31 (ГОСТ 5267.1-90), в конструкції базової рами напіввагона моделі 12-783 доцільно використовувати швелер № 30В2 (ГОСТ 5267.3-90) з відповідним доопрацюванням технології виробництва.
7. Результати досліджень , проведених для напіввагона моделі 12-783 можуть бути розповсюджені на вагон бункерного типу для перевезення зерна моделі 19-765

					ДІП.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 7598:2014 «ВАГОНИ ВАНТАЖНІ. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)».- Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 162с
2. Нескородєв В.І. Вибір розрахункової схеми та розрахунки на міцність рами напіввагону з модернізованою хребтовою балкою / Наука і сталий розвиток транспорту 2023. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. Т. I, с. 18.- Дніпро, УДУНТ, 2023 – 136 с.
3. Бондаренко М.О., Аналіз конструкцій залізничних вагонів і методів їх розрахунку на міцність Вісник НТУ «ХПІ».. № 14 (1057) Харків: ХПІ, 2014 - 8с.
4. Корнійчук, М.П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту. Частина 1: Підручник/ М.П.Корнійчук, Н.В.Липовець, Д.О.Шамрай.-К.:Дельта, 2006-500с
5. Корнійчук, М.П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту. Частина 2: Підручник/ М.П.Корнійчук, Н.В.Липовець, Д.О.Шамрай.-К.:Дельта, 2006-424с
6. Стренг Г., Фікс Дж. Теорія методу скінченних елементів. М. : Мир, 1977. – 351 с
7. В.А. Баженов. А.В. Перельмутер, О.В.Шишов. Будівельна механіка (Комп'ютерні технології і моделювання). - Київ ПАТ “ВПІОЛ” 2013. – 896с
8. Кельріх, М.Б. Будівельна механіка вагонів: навчальний посібник / М.Б. Кельріх, О.В. Фомін – Київ: ДЕГУТ, 2016. – 249 с.
9. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основи динаміки вагонів: Навчальний посібник. - К.: КУЕТТ, 2003. - 270 с.
10. Кирпа, Г.М. Залізниці України Г.М.Кирпа, О.М.Пшінько, І.В.Огієнко.- Дніпропетровськ:Арт-Пресс, 2001.-328с.

					ДПТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

11. Правила технічної експлуатації залізниць України – К.: Поліграф
сервіс, 2002 – 133с.

					ДІТ.300000.612.КРПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54