

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ТОВТ БОГДАН МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 629.4.023./42.001.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ НЕСУЧИХ
КОНСТРУКЦІЙ КУЗОВІВ КОЛІЙНИХ МАШИН**

Спеціальність 05.22.07 - рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2012 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Теоретична механіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, с.н.с.
Костриця Сергій Анатолійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна,
завідувач кафедри «Будівельна механіка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, с.н.с.
Радченко Микола Олексійович,
Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України «Трансмаг»,
провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук, с.н.с.
Маркова Ольга Михайлівна,
Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і НКАУ),
учений секретар ІТМ НАНУ і НКАУ

Захист відбудеться 20 квітня 2012 р. о 13⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (ДПТ) за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Академіка Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (ДПТ) за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Академіка Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий 17 березня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., проф.

Жуковицький І. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Залізничний транспорт відіграє важливу роль у розвитку економіки України і на сьогоднішній день розроблена і впроваджується концепція розвитку залізничного транспорту. Якісна та ефективна реалізація означеної програми передбачає необхідність у вдосконаленні існуючих і створенні нових конструкцій колійних машин з покращеними техніко-економічними показниками, зокрема підвищеними міцнісними характеристиками та зниженою матеріалоємністю. Розв'язання задач з підвищення міцнісних характеристик і зниження матеріалоємності як існуючих несучих конструкцій колійних машин, так і тих, що проектуються, потребує удосконалення технології проектування. Один із можливих шляхів такого удосконалення полягає у залученні сучасних методів проектування, серед яких можна виділити оптимальне проектування. Тому тему дисертаційної роботи, присвячену удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин, слід вважати актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок досліджень дисертації відповідає Транспортній стратегії України до 2020 року. Напрямок досліджень також відповідає пріоритетним напрямкам науково-технічного розвитку держави і науково-дослідних робіт Міністерства інфраструктури України, «Укрзалізниця», планам науково-дослідних робіт Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Комплексні приймальні випробування рейкозварювальної колійної машини КРС-1» (НДР 91.310), «Комплексні приймальні випробування колійної машини планувальника баласту СПЗ-5/UA» (НДР 91.314), за якими дисертант є виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у вдосконаленні технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин шляхом обґрунтування, апробації і практичної реалізації чисельної процедури оптимізації до задач вибору раціональних параметрів несучих конструкцій кузовів колійних машин на стадії проектування.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- на основі огляду і аналізу сучасного стану теорії математичного програмування і оптимального проектування обрати метод оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин;
- розробити чисельну процедуру оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин;
- провести апробацію запропонованої процедури для типових задач оптимізації конструкцій, подібних до поширених варіантів несучих конструкцій кузовів сучасних колійних машин;
- дослідити математичні аспекти використання запропонованої процедури оптимізації, зокрема збіжність її алгоритму;
- обрати раціональні параметри для несучих конструкцій кузовів ряду існуючих колійних машин;

- довести достовірність результатів роботи оптимізаційної процедури шляхом спеціальних перевірочних досліджень.

Об'єктом досліджень є процес створення раціональних несучих конструкцій кузовів колійних машин.

Предметом досліджень є удосконалення технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин.

Метод дослідження. У роботі поєднуються обчислювальний і натурний методи досліджень. Обчислювальний метод базується на використанні одного з сучасних методів оптимізації і методу скінченних елементів. Натурний метод дослідження базується на використанні експериментального методу визначення напружено-деформованого стану несучих конструкцій кузовів колійних машин – ходових динамічних випробуваннях на міцність.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну мають перелічені результати досліджень, які були отримані вперше у дисертації, або були вдосконалені:

- вперше запропоновано для вирішення задач вибору раціональних параметрів несучих конструкцій кузовів колійних машин чисельну процедуру оптимізації, яка базується на спільному використанні доопрацьованого методу проєкцій градієнтів і методу скінченних елементів і доведено збіжність її алгоритму для такого класу задач;
- вперше проведено апробацію запропонованої процедури для типових задач оптимізації конструкцій, подібних до поширених варіантів несучих конструкцій кузовів сучасних колійних машин;
- вперше для ряду несучих конструкцій кузовів колійних машин отримано раціональні параметри зі зниженою матеріалоємністю при збереженні міцнісних характеристик;
- удосконалено технологію проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин в частині обґрунтування вибору раціональних параметрів несучих конструкцій кузовів колійних машин.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що отримані раціональні проєкти несучих конструкцій колійних машин запроваджені у промисловості та дозволили створити конструкції, які задовольняють експлуатаційним вимогам при менших витратах матеріальних ресурсів у порівнянні з існуючими. Запропонована у роботі чисельна процедура оптимізації може бути використана для задач вибору раціональних параметрів несучих конструкцій кузовів інших колійних машин.

Впровадження результатів. Висновки і рекомендації, що містяться у дисертації, впроваджені на ВАТ «Каховський завод електрозварювального обладнання» (КЗЕЗО) і у Головному управлінні колійного господарства «Укрзалізниці» при вдосконаленні несучих конструкцій кузовів рейкозварювальної колійної машини КРС-1 і планувальника баластної призми СПЗ-5/УА.

Достовірність основних результатів. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться у дисертації, достатньо обґрунтовані і достовірні, оскільки забезпечуються коректною постановкою технічної задачі, ви-

користанням сучасних вимірювальних систем в експерименті, апробованих розрахункових схем, узгодженістю результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення, які становлять суть дисертації, отримані автором самостійно. Публікація за темою дисертації [4] виконана самостійно, у роботах підготовлених у співавторстві, автору належить наступне: у роботі [1] апробовано запропоновану процедуру оптимізації на прикладах тристрижневої ферми і 7-стрижневого балкового ростверку, досліджено збіжність процедури оптимізації, у роботі [2] створено скінченно-елементу модель рами планувальника баластної призми СПЗ-5, виконано дослідження напружено-деформованого стану змодельованої конструкції методом скінченних елементів, обчислено коефіцієнти запасу утомної міцності, у роботі [3] виконано дослідження напружено-деформованого стану несучої конструкції кузову рейкозварювальної колійної машини КРС-1, обчислено коефіцієнти запасу утомної міцності, отримані як у ході обчислювального експерименту, так і у ході натурних випробувань, проведено аналіз результатів дослідження.

Постановку задач, аналіз і трактування основних результатів, формулювання наукових висновків і рекомендацій проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях і семінарах: II Міжнародний молодіжний фестиваль науки «Litteris Et Artibus» у рамках I Міжнародної наукової конференції молодих вчених «Інженерна механіка та транспорт 2010». ЕМТ-2010 (Львів, 2010), 71 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2011), X International Conference «Engineer of the 3rd Millennium» (Dnipropetrovsk, 2011), Міжкафедральний науковий семінар кафедр будівельної механіки, теоретичної механіки та Галузевої науково-дослідної лабораторії динаміки та міцності рухомого складу ДПТУ (Дніпропетровськ, 2011). Також матеріали роботи доповідались і обговорювались на засіданнях кафедр «Теоретична механіка» і «Будівельна механіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 6 наукових праць, з яких 4 – у виданнях, що входять до переліку ВАК України, 2 – тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаної літератури і двох додатків, з яких основний зміст викладено на 133 сторінках, що містять 59 рисунків і 19 таблиць. Перелік використаної літератури складається зі 114 найменувань, викладених на 10 сторінках. Повний об'єм дисертації складає 145 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність удосконалення технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин, визначено об'єкт, предмет і метод досліджень. Формулюється мета і постановка задач, які вирішуються на основі запропонованої чисельної процедури оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин. Вказуються положення, які виносяться автором на захист, що складають наукову новизну і практичну цінність.

Перший розділ присвячено огляду і аналізу сучасного стану теорії математичного програмування і оптимального проектування. Теорія оптимального проектування конструкцій є тим ключовим напрямком науки, на базі досягнень якого мають створюватися механічні конструкції. Теорія оптимізації конструкцій почала активно розвиватися у 60-ті роки, останні десятиріччя сформували нові напрямки, були отримані значні результати, як теоретичні, так і прикладні. Кількість публікацій, присвячених теорії оптимізації конструкцій, зростає. Значний внесок у розвиток теорії та розробку методів розв'язання задач оптимізації конструкцій внесли такі науковці, як Я. Арора, Е. Хог, Р. Хафтка, З. Гьордал, М. Бендсо, П. Хайєла, П. Сеймур, О. Сігмунд, З. Васютинський, Ф. Гілл, Д. Келлер, М. Леві, З. Мруз, Ф. Ніордсон, Н. Ольхофф, В. Прагер, Г. Реклейтіс, Дж. Розен, Д. Розвани, Д. Тейлор, М. Тернер, Р. Шилд та інші. Серед вітчизняних вчених найбільший внесок мають М. В. Банічук, А. І. Віноградов, Л. М. Воробйов, Ю. Б. Гольдштейн, Г. І. Гребенюк, Б. В. Гриньов, В. О. Кисельов, В. А. Комаров, І. Б. Лазарєв, Л. С. Ляхович, В. П. Малков, Д. О. Мацюлявічус, Ю. В. Неміровський, Є. Л. Ніколаї, Ю. М. Почтман, І. М. Рабінович, Ю. О. Радциг, О. Р. Ржаніцин, О. П. Сейранян, М. Л. Сергєєв, М. М. Складнєв, О. Ф. Смірнов, В. О. Троїцький, О. П. Філін, О. П. Філіпов, О. О. Чірас та ін.

У першому розділі наведено короткий огляд наукових праць, що відносяться до розглянутої проблематики, визначено основні поняття теорії математичного програмування, наведено головні теореми теорії оптимального проектування із посиланнями на докази. Розглянуто найбільш поширені чисельні методи оптимізації, окремо розглянуто проєктивні методи умовної оптимізації. На основі виконаного огляду сучасного стану теорії методів оптимізації обрано один із поширених методів у якості базового для подальшої побудови процедури чисельної оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин. Таким методом став метод проєкцій градієнтів, який задовольняє ряду висунутих до нього вимог.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню і апробації процедури чисельної оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин. Наведено у деталях класичну постановку методу проєкцій градієнтів. Як було встановлено у результаті проведеного аналізу сучасного стану теорії оптимального проектування конструкцій, переважна кількість чисельних методів оптимізації потребує обчислення змінних стану конструкції при дії певного навантаження, а також градієнтів функцій, що задають обмеження на змінні проектування і стану. При розгляді складних інженерних конструкцій, до яких відносяться і несучі конс-

трукції кузовів колійних машин, для визначення змінних стану найбільш ефективним є метод скінченних елементів (МСЕ), але його застосування у процедурі оптимізації викликає певні труднощі. А саме, відсутність аналітичної залежності коефіцієнтів матриці жорсткості конструкції від змінних проектування робить неможливим визначення у явному вигляді градієнтів функцій, які задають обмеження на змінні стану.

Для розв'язання задач оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин пропонується ітераційна процедура, робота якої базується на застосуванні стандартних програмних комплексів, які реалізують МСЕ, і одному з поширених методів умовної оптимізації – методі проекцій градієнтів (МПП) [1].

Задача нелінійного математичного програмування у формальній постановці формулюється так: знайти такий вектор змінних проектування (проект конструкції) $b \in R^k$, який мінімізує функціонал якості $\psi_0(b)$ при заданих обмеженнях $\psi_i(b) = 0, i = 1, \dots, n, \psi_i(b) \leq 0, i = n + 1, \dots, m$,

Для вирішення задачі застосовано МПП, алгоритм якого базується на тому, що на кожній ітерації функціонал якості зменшується, а обмеження не порушуються.

Основну складність при використанні МПП для оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин представляє процедура обчислення матриці градієнтів функцій, які задають обмеження на змінні проектування і параметри стану конструкції.

Матриця обмежень A має вигляд:

$$A = \left(\frac{\partial \psi(B, Z)}{\partial B} \right)^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial b_1} & \frac{\partial \psi_1}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial \psi_1}{\partial b_j} \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial b_1} & \frac{\partial \psi_2}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial \psi_2}{\partial b_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \psi_m}{\partial b_1} & \frac{\partial \psi_m}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial \psi_m}{\partial b_j} \end{bmatrix},$$

де Z – вектор розмірності m змінних стану;

B – вектор розмірності j змінних проектування.

Елементи матриці $\frac{\partial \psi(B, Z)}{\partial B}$ можна знайти шляхом диференціювання

аналітичних залежностей обмежень від змінних проектування. Але при оптимізації реальних конструкцій такі залежності отримати практично неможливо, тому складові елементи матриці обмежень отримуються чисельно. З цією метою використовуємо відомий вираз для обчислення частинних похідних функції багатьох змінних:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial b_k} = \frac{\psi_i(b_1, b_2, \dots, b_k + \Delta b_k, \dots, b_j) - \psi_i(b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_j)}{\Delta b_k}.$$

Визначення значень функції ψ_i виконується розрахунком конструкції за МСЕ. А саме, спочатку визначаються напруження σ'_i у елементі, для якого задані обмеження, потім, після надання приросту k -му параметру, розрахунок повторюється та визначається напруження σ''_i за зміненого значення k -го параметра.

Складові матриці обмежень визначаються як:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial b_k} = \frac{\sigma''_i - \sigma'_i}{\Delta b_k}.$$

З метою якісної оцінки впливу варіацій змінних проектування на цільову функцію використовується вираз:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial b_k} = \frac{\sigma''_i - \sigma'_i}{\Delta b_k} \cdot \lambda,$$

де λ – нормуючий множник, який обчислюється за виразом:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\sigma''_j - \sigma'_j}{\Delta b_k} \right)^2}}.$$

Недоліком такої методики можна назвати необхідність перерахунку конструкції за МСЕ. Проте це нівелюється сучасним рівнем розвитку обчислювальної техніки. Важливою особливістю запропонованої методики є невелика розмірність матриці обмежень. Наприклад, у задачах оптимізації несучих конструкцій колійних машин, міцність конструкції за деякого виду навантаження обумовлена міцністю кількох елементів. З цього виходить, що число функцій обмежень за міцністю і розмірність матриці обмежень A , як правило, невеликі.

Згідно запропонованої процедури, змінні стану конструкції на кожному кроці визначаються безпосередньо з використанням МСЕ, а градієнти функцій, які задають обмеження на них – опосередковано, з використанням чисельної апроксимації. Таким чином, застосування такої процедури дозволяє уникнути вищевказаних складностей при оптимізації реальних конструкцій колійних машин.

Чисельну процедуру було апробовано на ряді задач оптимізації конструкцій, подібних до найбільш поширених несучих конструкцій колійних машин [1]. Для тестової оптимізації було обрано рамну конструкцію, що не містить центральний повздовжній елемент (7-балковий ростверк, рис. 1, далі конструкція А) і рамну конструкцію, що містить центральний повздовжній елемент (6-балковий ростверк, рис. 2, далі конструкція В). У обох конструкціях складові елементи мали прямокутний поперечний переріз.

Постановка задачі оптимізації полягала у знаходженні такого проекту конструкції (оптимального), при якому б значення цільової функції було найменшим при виконанні усіх визначених у задачі обмежень.

У якості змінних проектування для обох конструкцій було обрано параметри поперечних перерізів складових елементів, причому вони приймалися сталими за довжиною відповідного елемента.

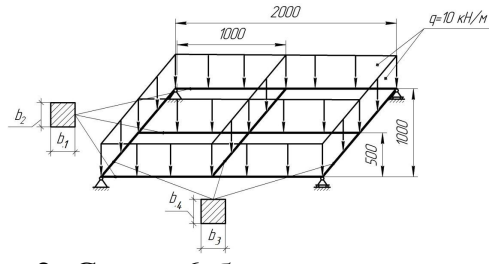
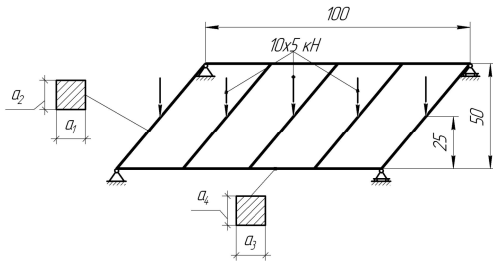


Рис. 1. Схема 7-балкового ростверку

Рис. 2. Схема 6-балкового ростверку

Вектор змінних проектування для конструкції А має вигляд:

$$\vec{a}^0 = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]^T,$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 – параметри поперечних перерізів складових елементів конструкції А (рис. 1).

Вектор змінних проектування для конструкції В:

$$\vec{b}^0 = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T,$$

де b_2 і b_4 – висоти поперечних перерізів складових елементів конструкції В,
 b_1 і b_3 – ширини поперечних перерізів балок ростверку В, сталі величини у рамках даної задачі $b_1 = b_3 = 4$ см (рис. 2).

У якості цільової функції для обох конструкцій було обрано загальний об'єм. Цільова функція для конструкції А має вираз:

$$\psi_{0A} = 5 \cdot (50 \cdot a_1 \cdot a_2) + 2 \cdot (100 \cdot a_3 \cdot a_4), \text{ см}^3.$$

Цільова функція для конструкції В:

$$\psi_{0B} = 100 \cdot 3 \cdot (b_1 \cdot b_2) + 200 \cdot 3 \cdot (b_3 \cdot b_4), \text{ см}^3.$$

Обмеження на змінні стану для обох конструкцій були задані однаково – у вигляді умови міцності за допустимими напруженнями:

$$\sigma^{(i)} - [\sigma] = 0,$$

де $\sigma^{(i)}, i = 1, 2$ – дійсні напруження у відповідних елементах конструкції;
 $[\sigma]$ – допустиме напруження, приймалося $[\sigma] = 200$ МПа.

Обмеження на змінні проектування також були задані однаково – у вигляді умови невід'ємності розмірів конструкції:

$$a_k > 0, k = 1, \dots, 4,$$

$$b_k > 0, k = 2, 4.$$

Для конструкції А було обрано два початкові проекти $\vec{a}_1^0 = [3 \ 4 \ 3 \ 5,5]^T$ і $\vec{a}_2^0 = [3,5 \ 3,5 \ 4,5 \ 4,5]^T$, а для конструкції В – чотири початкові проекти $\vec{b}_1^0 = [4 \ 6 \ 4 \ 8]^T$, $\vec{b}_2^0 = [4 \ 7,3 \ 4 \ 7,3]^T$,

$\vec{b}_3^0 = [4 \ 10 \ 4 \ 8]^T$ і $\vec{b}_4^0 = [4 \ 4 \ 4 \ 4]^T$, причому останній знаходився у недопустимій зоні згідно обмежень на змінні стану.

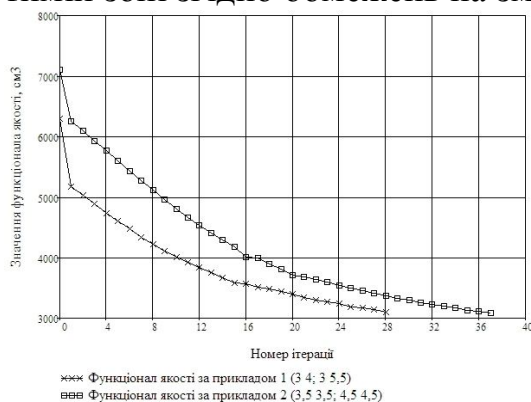


Рис. 3. Зміна цільової функції у процесі оптимізації 7-стрижневого ростверку

Аналіз результатів вагової оптимізації 7-балкового ростверку показав, що вибір різних початкових проектів не впливає на кінцевий результат – отримання єдиного оптимального проекту (рис. 3). Оптимальний проект був досягнутий за 28 і 37 ітерацій, в залежності від початкового проекту. У результаті вагової оптимізації 7-балкового ростверку вдалося отримати 56 % зменшення ваги конструкції (табл. 1).

Таблиця 1

Результати чисельної оптимізації 7-балкового ростверку

Початковий проект	Зменшення цільової функції, %	Кількість ітерацій процесу оптимізації
\vec{a}_1^0	51	28
\vec{a}_2^0	56	37

Хід оптимізаційної процедури для конструкції В проілюстрований графіками зміни цільової функції в залежності від ітерації (рис. 4, а), а також однієї зі змінних проектування в залежності від ітерації (рис. 4, б). Для початкового проекту у недопустимій зоні цільова функція зростає, тому на рис. 4, а відповідна лінія не показана.

Аналіз результатів вагової оптимізації 6-балкового ростверку підтвердив, що вибір різних початкових проектів не впливає на отримання оптимального розв'язку задачі (рис. 4). Причому при виборі початкового проекту \vec{b}_4^0 у недопустимій зоні (рис. 4, б) у результаті оптимізації було отримано той самий кінцевий проект, як і при виборі початкових проектів у допустимій зоні, що свідчить про збіжність алгоритму процедури. Оптимальний проект був досягнутий за 4, 7, 12 і 5 ітерацій, в залежності від початкового проекту. У результаті оптимізації 6-балкового ростверку вдалося отримати 11,4% зменшення ваги конструкції (табл. 2).

еквівалентних напружень за теорією міцності Губера-Мізеса-Генкі з урахуванням коефіцієнту динаміки $k = 1,5$, склало 82,5 МПа (рис. 5, а), що є значно нижчим за допустимі напруження, які становлять 155 МПа для сталі 09Г2 (згідно ОСТ 36.62-96. Нормы прочности металлоконструкций путевых машин).

Дослідження напружено-деформованого стану планувальника баластної призми СПЗ-5 за МСЕ у робочих режимах виявило, що найбільш несприятливим для конструкції є режим роботи двох центральних плугів. У цьому режимі найбільші значення напружень були отримані у місцях кріплення бічних і середніх плугів. Значення головних напружень досягли 68 МПа (рис. 5, б), еквівалентних – 72 МПа, що є значно нижчим за допустимі напруження 155 МПа [2].

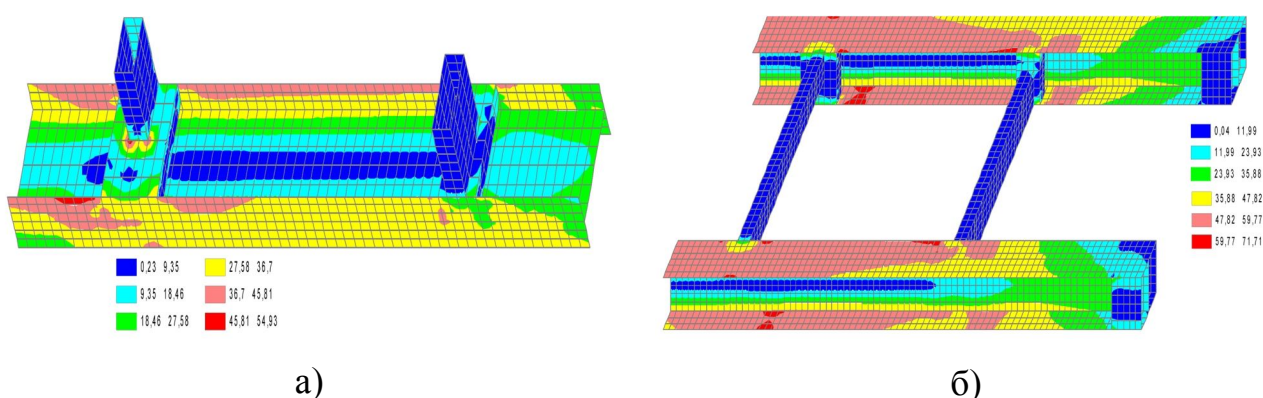


Рис. 5. Поля еквівалентних напружень (МПа) у найбільш навантаженій центральній частині рами (а – статичне навантаження, б – робочий режим)

Ходові динамічні випробування на міцність дослідної машини СПЗ-5 проводилися Галузевою науково-дослідною лабораторією динаміки та міцності рухомого складу (ГНДЛ ДМРС) Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. Метою випробувань була перевірка відповідності конструкції машини та її міцнісних показників вимогам Технічного завдання, нормативних документів, які визначають умови безпеки руху та експлуатації.

Оцінка міцності несучої конструкції планувальника для робочих режимів проводилася за допустимими напруженнями, а для транспортного режиму – за допустимими напруженнями і коефіцієнтами утомної міцності. У результаті обробки експериментальних даних було встановлено, що утомна міцність несучої рами дослідної машини забезпечується, оскільки мінімальне отримане значення коефіцієнту запасу утомної міцності 2,84 було не менше за нормативне значення $[n] = 1,5$. До того ж, як видно з табл. 3 результати дослідження напружено-деформованого стану за МСЕ добре узгоджуються з результатами ходових динамічних випробувань на міцність.

Коефіцієнти запасу утомної міцності несучої конструкції машини СПЗ-5

Характерні місця конструкції	Розрахунок конструкції за МСЕ	Ходові динамічні випробування на міцність	Допустиме значення $[n]$
C1	2,41	2,72	1,5
C2	3,73	3,45	
C4	3,04	2,80	
P4	3,51	4,03	
P5	3,51	4,26	

Аналіз отриманих результатів показав, що несуча конструкція планувальника баластної призми СПЗ-5/UA має значний запас міцності і її маса може бути зменшена. Для вирішення означеної задачі було використано запропоновану у роботі чисельну процедуру оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин [2].

Постановка задачі оптимізації несучої конструкції планувальника баластної призми: у якості цільової функції, яка мінімізувалася, виступила площа поперечного перерізу бічної несучої балки рами $\psi_0 = 2Bt + Hd$, см². У якості змінних проектування виступили висота H і ширина B поперечного перерізу бічної несучої балки рами, причому вони приймалися сталими за довжиною відповідного елемента. Були накладені обмеження на напруження у цій балці $\sigma = [\sigma]$, а також обмеження на змінні проектування $B \geq 10$ см, $0 < H \leq 30$ см. Дослідження проводилися за сталих значень товщини стійки $d = 0,7$ см і $d = 0,6$ см і товщини полиці $t = 1$ см. У якості початкового проекту було обрано реальний проект конструкції з наступними значеннями змінних проектування і параметрів конструкції: $H^0 = 30$ см, $B^0 = 30$ см, $t = 1,9$ см, $d = 1,1$ см зі значення цільової функції $\psi_0^0 = 147$ см². З метою контролю роботи оптимізаційної процедури було виконано додаткові оптимізаційні розрахунки з початковим проектом, який мав такі значення змінних проектування і параметрів конструкції: $H = 20$ см, $B = 20$ см, $t = 1,9$ см, $d = 1,1$ см.

Поперечні балки рами було вирішено виключити з процедури оптимізації, оскільки зміна їх розмірів є недоцільною з технологічних міркувань.

На рис. 6 показані графіки зміни цільової функції та однієї зі змінних проектування у процесі оптимізації несучої конструкції планувальника баластної призми СПЗ-5 в залежності від обраного початкового проекту.

У результаті чисельної оптимізації несучої рами машини СПЗ-5 (рис. 6, а) було отримано 73% зменшення площі поперечного перерізу бічної несучої балки (табл. 4). У перерахунку на масу металу, це складає 1101 кг економії (з урахуванням того, що існуюча конструкція має масу 1529 кг, а оптимізована – 428 кг). Раціональний проект конструкції несучої рами планувальника баластної призми СПЗ-5, отриманий внаслідок удосконалення, є прийнятним з інженер-

них і технологічних міркувань. На рис. 7 показано візуальне порівняння вихідного (реального) і раціональних проектів поперечних перерізів повздовжньої балки планувальника. Для отриманих раціональних проектів стійкість забезпечується згідно розрахунку за БНП II-23-81*.

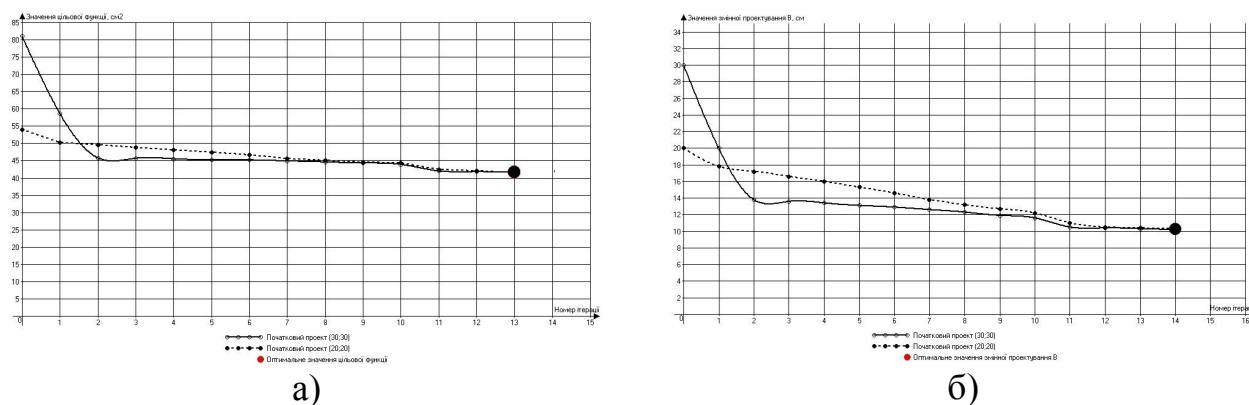


Рис. 6. Процес оптимізації планувальника СПЗ-5 (а – зміна цільової функції, б – зміна ширини полиці B)

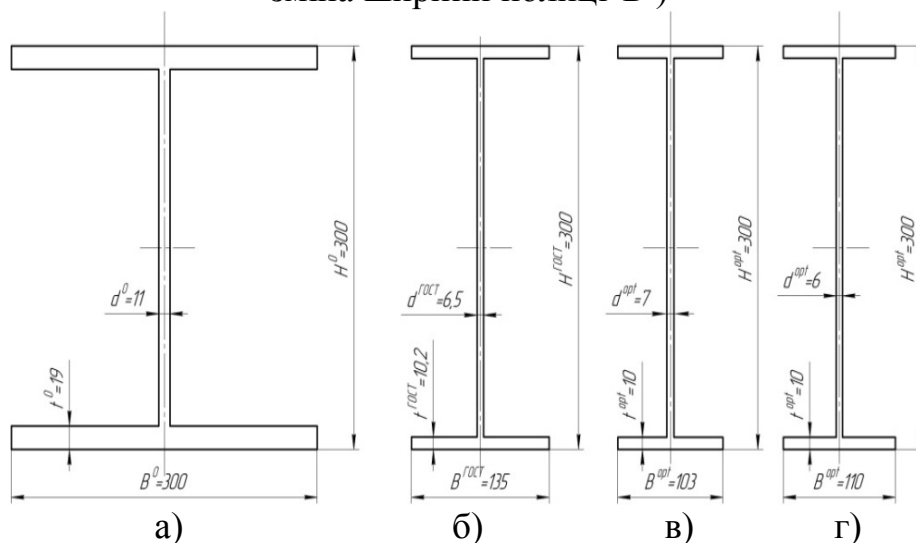


Рис. 7. Реальний і раціональні проекти поперечних перерізів повздовжньої балки машини СПЗ-5/UA (а – реальний проект, б – двотавр №30 ГОСТ 8239-89, в – раціональний проект з $d = 7$ мм, г – раціональний проект з $d = 6$ мм)

Для раціональної несучої конструкції досліджуваної машини було виконано оцінку міцності за критерієм допустимих напружень і критерієм коефіцієнту запасу утомної міцності. Аналіз результатів дослідження напружено-деформованого стану раціональної несучої конструкції машини СПЗ-5 показав, що ця конструкція має достатній запас міцності.

Результати удосконалення несучої конструкції машини СПЗ-5/УА

	Реальний проект ($d = 1,1$ см, $t = 1,9$ см)	Двотавр №30 ГОСТ 8239-89 ($d = 6,5$ см, $t = 1,02$ см)	Раціональний проект ($d = 0,6$ см, $t = 1$ см)	Раціональний проект ($d = 0,7$ см, $t = 1$ см)
H , см	30			
B , см	30	13,5	11,0	10,3
W_z , см ³	1612	465	382	374
σ , МПа	72	147	155	155
$[\sigma]$, МПа	155			
ψ_0 , см ²	147	46,5	40,0	41,6
$\Delta\psi_0$, %	–	68	73	72

У четвертому розділі досліджено напружено-деформований стан і удосконалено несучу конструкцію рейкозварювальної колійної машини КРС-1, яка призначена для зварювання рейок при ремонті безстикової колії, а також одиничних рейок у безстикові плеті на станційних коліях.

Оцінка міцності несучої конструкції рейкозварювальної машини проводилася для транспортного режиму експлуатації. Метою дослідження напружено-деформованого стану машини КРС-1 за МСЕ була перевірка відповідності конструкції умовам міцності, а також визначення місць встановлення тензOMETричних датчиків для проведення ходових міцнісних випробувань. Також за результатами розрахунку були визначені статичні напруження з послідуною оцінкою коефіцієнту запасу утомної міцності.

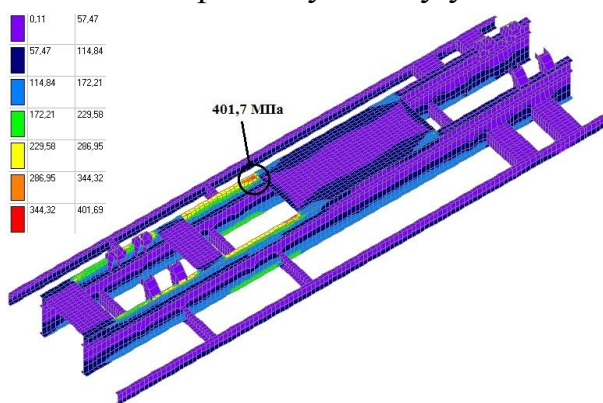


Рис. 8. Поле еквівалентних напружень у центральній частині несучої рами рейкозварювальної колійної машини КРС. Транспортний режим (МПа)

Розрахунок у транспортному режимі показав, що найбільш навантаженою частиною конструкції є середня частина, де максимальне значення еквівалентних напружень з урахуванням коефіцієнту динаміки $k = 1,5$, склало 402 МПа (рис. 8), що є значно вищим за допустимі напруження, які становлять 155 МПа для сталі Ст3 сп5 ГОСТ 535-88 [4].

Таким чином, міцність існуючої несучої рами машини КРС-1 за допустимими напруженнями не забезпечувалася.

Також було встановлено, що утомна міцність цієї конструкції не забезпечувалася, оскільки отримані значення коефіцієнтів запасу утомної міцності для найбільш навантажених ділянок були менші за допустиме значення [4].

Особливість задачі удосконалення несучої конструкції машини КРС-1 полягала у тому, що максимальні напруження у конструкції значно перевищували допустиме значення, іншими словами у початковому проекті були порушені обмеження на змінні стану. У якості цільової функції, яка була мінімізована, було обрано площу поперечного перерізу основного несучого елемента $\psi_0 = 2Bt + Hd$ см². Змінними проектування виступили параметри двотаврового перерізу – висота H і ширина полиці B , причому вони приймалися сталими за довжиною відповідного елемента. Були накладені обмеження на напруження у цій балці $\sigma = [\sigma]$, а також обмеження на змінні проектування $B > 0$ см, $H > 0$ см. У якості початкового проекту було обрано реальний проект конструкції $H = 36$ см, $B = 13$ см зі значенням цільової функції $\psi_0^0 = 75,8$ см².

На рис. 9 приведено графіки зміни цільової функції та змінних проектування задачі у ході оптимізації конструкції машини КРС-1 [4]. На першій ітерації спостерігається збільшення значення цільової функції. На перший погляд, це суперечить ідеї оптимізації конструкцій, згідно якої на кожній новій ітерації має знаходитися проект зі все меншим значенням цільової функції. Пояснюється це специфікою задачі, адже, як вже зазначалося, у вихідному проекті конструкції значення змінних стану порушували обмеження і вирішувалася задача додання оптимальної кількості матеріалу.

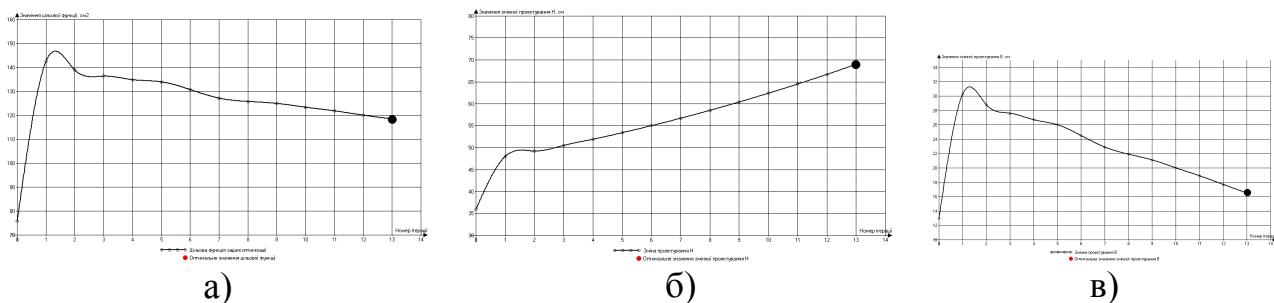


Рис. 9. Процес оптимізації колійної машини КРС-1 (а – зміна цільової функції, б – зміна висоти H , в – зміна ширини полиці B)

У результаті чисельної оптимізації несучої рами машини КРС-1 (рис. 9) було отримано 56,2% збільшення площі поперечного перерізу повздовжньої несучої балки (табл. 5). Іншими словами, площу поперечного перерізу даного елемента необхідно збільшити на 56,2% для того, щоб несуча рама задовольнила умові міцності за допустимими напруженнями. На рис. 10 наведене візуальне порівняння вихідного (реального) і раціонального проектів поперечних перерізів повздовжньої балки рейкозварювальної колійної машини.

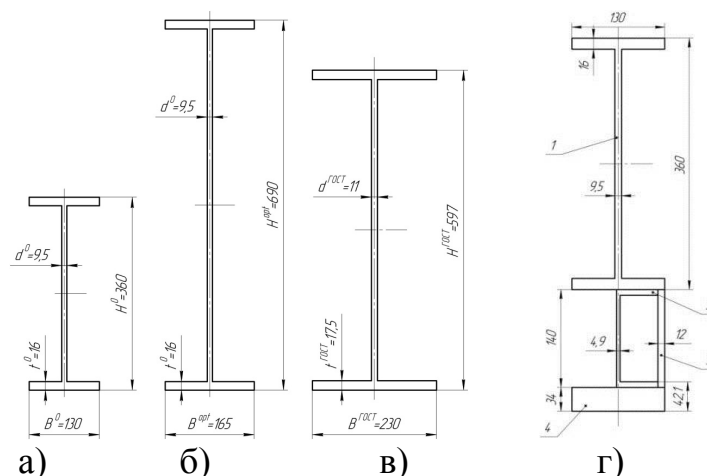


Рис. 10. Проекти поперечних перерізів основного несучого елемента рами колійної машини КРС-1 (а – реальний проект, б – раціональний проект, в – двотавр №60Б2 ГОСТ 26020-83, г – удосконалений підприємством проект)

Підприємством-виготовлювачем було прийнято рішення про вдосконалення існуючого поперечного перерізу основного повздовжнього елемента шляхом посилення (рис. 10, г).

Таблиця 5

Результати удосконалення несучої конструкції колійної машини КРС-1

	Реальний проект ($d = 0,95$ см, $t = 1,6$ см)	Двотавр №60Б2 ГОСТ 26020-83 ($d = 1,75$ см, $t = 1,1$ см)	Раціональний запропонований проект ($d = 0,95$ см, $t = 1,6$ см)	Удосконалений підприємством проект ($d = 0,95$ см, $t = 1,6$ см)
H , см	36	59,7	69,0	53,4
B , см	13	23,0	16,5	13
W_z , см ³	840	2936	2392	2424
σ , МПа	432	138	158	146
$[\sigma]$, МПа	155			
ψ_0 , см ²	75,8	146,2	118,4	150,7
$\Delta\psi_0$, %	–	92,9	56,2	99,2

Для вдосконаленої підприємством-виготовлювачем конструкції рейкозварювальної колійної машини КРС-1 був проведений комплекс досліджень, у тому числі, аналітичне дослідження за МСЕ і ходові динамічні випробування на міцність [3]. Оцінка міцності виконувалася для транспортного режиму експлуатації. Метою дослідження напружено-деформованого стану машини КРС-1 за МСЕ була перевірка відповідності конструкції умовам міцності, а також визначення місць встановлення тензометричних датчиків для проведення ходових

міцнісних випробувань. Також, за результатами розрахунку були визначені статичні напруження з послідуною оцінкою коефіцієнту запасу утомної міцності.

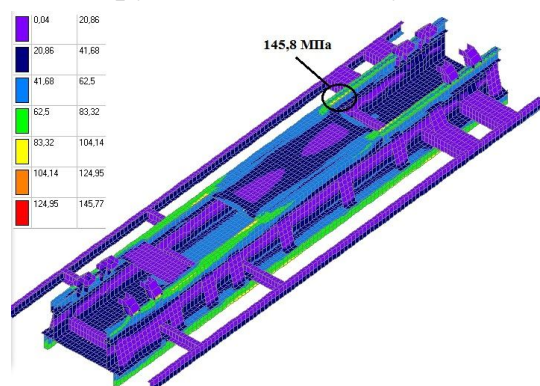


Рис. 11. Поля еквівалентних напружень у центральній частині оптимізованої несучої рами. Транспортний режимі (МПа)

Метою випробувань була перевірка відповідності конструкції машини та її міцнісних показників вимогам Технічного завдання, нормативних документів, які визначають умови безпеки руху та експлуатації.

У результаті обробки експериментальних даних було встановлено, що утомна міцність несучої рами дослідної машини забезпечується, оскільки мінімальне отримане значення коефіцієнту запасу утомної міцності 1,98 не менше за нормативне значення $[n]=1,5$. До того ж, як видно з табл. 6, результати дослідження напружено-деформованого стану за МСЕ добре узгоджуються з результатами ходових динамічних випробувань на міцність.

Таблиця 6

Коефіцієнти запасу утомної міцності для вдосконаленої несучої конструкції машини КРС-1, отримані за розрахунком по МСЕ

Місце конструкції	Розрахунок несучої конструкції за МСЕ	Ходові динамічні випробування на міцність	$[n]$
X6R	1,96	1,99	1,5
X7R	2,28	1,98	

Таким чином, вище наведені дані дозволяють зробити висновок, що вдосконалена підприємством-виготовлювачем несуча конструкція рейкозварювальної колійної машини КРС-1 має необхідний запас міцності як за коефіцієнтами запасу утомної міцності, так і за допустимими напруженнями [3].

Слід відмітити, що вдосконалений проект, використаний підприємством, має, по-перше, на 27,2% більшу площу у порівнянні із раціональним запропонованим, а по-друге, є менш технологічним. Саме тому, отриманий у результаті використання запропонованої у роботі чисельної процедури оптимізації, раціональний проект був рекомендований підприємству-виготовлювачу для впровадження у наступних моделях рейкозварювальної колійної машини КРС-1.

Розрахунок показав, що найбільш навантаженою частиною конструкції у транспортному режимі залишилася середня частина, де максимальне значення еквівалентних напружень склало 146 МПа (рис. 11), що є нижчим за допустимі напруження, які становлять 155 МПа, тобто міцність конструкції за допустимими напруженнями забезпечена [3].

Ходові динамічні випробування на міцність дослідної машини КРС-1 проводилися ГНДЛ ДМРС ДІТУ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі по удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин. За результатами роботи можна зробити такі основні висновки:

1. Запропоновано процедуру чисельної оптимізації несучих конструкцій колійних машин, що базується на спільному використанні методу скінчених елементів і одного з поширених методів оптимізації – методу проєкцій градієнтів.
2. Запропоновану процедуру чисельної оптимізації апробовано на ряді задач оптимізації конструкцій, подібних до поширених несучих конструкцій сучасних колійних машин.
3. У результаті дослідження ряду математичних аспектів використання запропонованої процедури чисельної оптимізації, доведено збіжність алгоритму процедури для класу задач оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин.
4. На основі аналізу напружено-деформованого стану несучих конструкцій планувальника баластної призми СПЗ-5/UA і рейкозварювальної колійної машини КРС-1 обґрунтовано необхідність проведення удосконалення несучих конструкцій кузовів означених машин.
5. За допомогою запропонованої у роботі процедури чисельної оптимізації отримано раціональні параметри несучих конструкцій планувальника баластної призми СПЗ-5/UA і рейкозварювальної колійної машини КРС-1 зі зниженою матеріалоемністю при збереженні міцнісних характеристик. У результаті удосконалення несучої рами планувальника СПЗ-5/UA маса основного повздовжнього елемента рами кузова зменшилася на 73%.
6. На основі аналізу результатів аналітичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану удосконалених несучих конструкцій планувальника баластної призми СПЗ-5/UA і рейкозварювальної колійної машини КРС-1 при дії експлуатаційних навантажень доведено, що їх міцність забезпечується.
7. Доведено достовірність результатів роботи оптимізаційної процедури шляхом спеціальних аналітичних перевірочних досліджень.
8. До основних практичних результатів роботи відноситься створення раціональних проєктів несучих конструкцій колійних машин, які запроваджені у промисловості та дозволили створити конструкції, які задовольняють експлуатаційним вимогам при менших витратах матеріальних ресурсів у порівнянні з існуючими.
9. Результати, отримані у дисертаційній роботі знайшли використання на ВАТ «Каховський завод електрозварювального обладнання» (КЗЕЗО) і у Головному управлінні колійного господарства «Укрзалізниці» при вдосконаленні несучих конструкцій кузовів рейкозварювальної колійної машини КРС-1 і планувальника баластної призми СПЗ-5/UA.

НАУКОВІ ПРАЦІ, У ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНО ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Костриця С. А. Чисельна реалізація методів математичного програмування у задачах оптимального проектування механічних конструкцій / Костриця С. А., Товт Б. М. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – № 30. – С. 150-154.
2. Костриця С. А. Дослідження напружено-деформованого стану несучих елементів конструкції планувальника баластної призми СПЗ-5/UA / Костриця С. А., Товт Б. М. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2011. – № 38. – С. 17-23.
3. Товт Б. М. Дослідження напружено-деформованого стану несучої конструкції рейкозварювальної колійної машини КРС-1 / Товт Б. М., Дзічковський Є. М., Кривчиков О. Є. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2011. – № 40. – С. 31-36
4. Товт Б. М. Оптимізація несучої конструкції рейкозварювальної колійної машини КРС-1 / Товт Б. М. // Системные технологии. – 2011. – № 5(76). – С. 59-71.

НАУКОВІ ПРАЦІ АПРОБАЦІЙНОГО ХАРАКТЕРУ

1. Костриця С. А. Чисельна реалізація методів математичного програмування у задачах оптимального проектування механічних конструкцій / Костриця С. А., Товт Б. М. // Тези доповідей 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 28.
2. Костриця С. А. Дослідження напружено-деформованого стану несучих елементів конструкції планувальника баластної призми СПЗ-5/UA / Костриця С. А., Товт Б. М. // Тези доповідей 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 27.

АНОТАЦІЯ

Товт Б. М. Удосконалення технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Дніпропетровськ, 2012.

Дисертацію присвячено удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів колійних машин. Виконано огляд і аналіз сучасного стану теорії оптимального проектування. Запропоновано чисельну процедуру оптимізації несучих конструкцій кузовів колійних машин, яка базується на спільному використанні методу скінченних елементів і методу проекцій градієнтів. Проведено апробацію запропонованої процедури на ряді задач оптимізації конструкцій, подібних до поширених колійних машин. Досліджено ряд математичних аспектів використання процедури, зокрема збіжність її алгоритму.

Досліджено напружено-деформований стан несучих конструкцій кузовів планувальника баластної призми СПЗ-5/UA і рейкозварювальної колійної машини КРС-1 аналітичним і експериментальним шляхом. Обґрунтовано необхідність проведення оптимізації несучої конструкції кузова планувальника і оптимального вдосконалення несучої конструкції кузова машини КРС-1. За допомогою запропонованої у роботі чисельної процедури оптимізації отримано раціональні проекти несучих конструкцій колійних машин СПЗ-5/UA і КРС-1. У результатів удосконалення несучої рами планувальника СПЗ-5/UA маса основного повздовжнього елемента рами кузова зменшилася на 73%.

Ключові слова: оптимізація, чисельна процедура, метод проекцій градієнтів, метод скінченних елементів, несуча конструкція, кузов, колійна машина, напружено-деформований стан, міцність, випробування.

ABSTRACT

Tovt B. M. Improvement of technique of designing of bearing structures of track machines bodies. – On rights for the manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences in a speciality 05.22.07 – railway rolling stock and traction of trains. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Ministry of education and science, youth and sport of Ukraine, Dnipropetrovsk, 2012.

The thesis is devoted to improvement of technique of designing of bearing structure of track machines bodies. The review and analysis of state-of-the-art of the optimal design is done. The numerical optimization procedure for bearing structures of track machines bodies is proposed. Proposed optimization procedure is founded on

joint use of the finite element method and the Gradient Projection Method. The approbation of the proposed procedure is taken on the row of problems of structure optimization. The structures are similar to the widespread versions of track machines. The row of the mathematical aspects of implementation of the proposed procedure are investigated, particularly the algorithm convergence.

The deflected mode of the bearing structures of bodies of the ballast leveling machine SPZ-5/UA the rail-welding track machine KRS-1 is investigated analytically and experimentally. The necessity of implementation of optimization of bearing structure of body of planer and optimal improvement of bearing structure of body of machine KRS-1 are substantiated. The rational designs of bearing structures of track machines SPZ-5/UA and KRS-1 are obtained with the numerical optimization procedure proposed in the work. The mass of the main side-member of body of the machine SPZ-5/UA is decreased on 73% consequently.

Keywords: optimization, numerical procedure, gradient projection method, finite element method, bearing structure, body, track machine, deflected mode, durability, testing.

АННОТАЦИЯ

Товт Б. Н. Усовершенствование технологии проектирования несущих конструкций кузовов путевых машин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна Министерства образования и науки, молодёжи и спорта Украины, Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи усовершенствования технологии проектирования несущих конструкций кузовов путевых машин. Цель работы достигнута путём обоснования, апробации и практической реализации численной процедуры оптимизации к задачам выбора рациональных параметров несущих конструкций кузовов путевых машин на стадии проектирования.

В работе выполнен обзор и анализ современного состояния теории математического программирования и оптимального проектирования. Предложена численная процедура оптимизации несущих конструкций кузовов путевых машин, которая основывается на совместном использовании метода конечных элементов и одного из распространённых релаксационных методов оптимизации – метода проекций градиентов в доработанной постановке. Метод проекций градиентов выбран на основании выполненного обзора и анализа теории оптимального проектирования. Проведена апробация предложенной процедуры на ряде задач оптимизации конструкций, подобных распространённым вариантам исполнения несущих конструкций кузовов путевых машин, в частности рассмотрены задачи весовой оптимизации шести- и семи-балочного ростверков. Исследован ряд математических аспектов использования предложенной проце-

дуры, в частности доказана численная сходимость алгоритма процедуры для задач выбора рациональных параметров несущих элементов конструкций кузовов путевых машин.

Исследовано напряжённо-деформированное состояние несущей конструкции кузова планировщика балластной призмы СПЗ-5/УА аналитическим (анализ по методу конечных элементов) и экспериментальным (ходовые динамические испытания на прочность) путём. Показана согласованность аналитического и экспериментального исследований. На основании проведенных исследований обоснована необходимость проведения усовершенствования несущей конструкции кузова планировщика балластной призмы. С целью анализа и контроля результатов решения подобной задачи, поставлена и решена задача оптимизации двутаврового поперечного сечения. При помощи предложенной в работе численной процедуры оптимизации, получены рациональные проекты несущей конструкции кузова путевой машины СПЗ-5/УА. В результате усовершенствования масса основного продольного элемента рамы кузова несущей рамы планировщика уменьшилась на 73%. С целью доказательства достоверности полученных результатов, выполнено специальное проверочное исследование.

Исследовано напряжённо-деформированное состояние несущей конструкции кузова рельсосварочной путевой машины КРС-1 аналитическим путём. На основании проведенного исследования обоснована необходимость проведения усовершенствования несущей конструкции кузова машины КРС-1. При помощи предложенной в работе численной процедуры оптимизации получен рациональный проект несущей конструкции рельсосварочной путевой машины КРС-1. Исследовано напряжённо-деформированное состояние несущей конструкции кузова машины КРС-1, предложенной предприятием-изготовителем, аналитическим (анализ по методу конечных элементов) и экспериментальным (ходовые динамические испытания на прочность) путём. На основании проведенных исследований сделано заключение об обеспечении прочности проекта конструкции кузова, предложенного предприятием-изготовителем. Показано, что использование рационального предложенного проекта предпочтительнее использования проекта, предложенного предприятием-изготовителем.

Ключевые слова: оптимизация, численная процедура, метод проекций градиентов, метод конечных элементов, несущая конструкция, кузов, путевая машина, напряжённо-деформированное состояние, прочность, испытания.

Товт Богдан Миколайович

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КУЗОВІВ КОЛІЙНИХ МАШИН

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку “14” березня 2012 р. Формат 60x84 1/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим. Замовлення № .

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. ДК 1315 від 31.03.2003.

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2