

## АНОТАЦІЯ

Швець А. О. Удосконалення метода оцінки міцності вантажних вагонів під час перевезення вантажу металургійного виробництва.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт. Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Головна мета наукових результатів дисертаційної роботи, що отримані автором та складають наукову новизну, полягають у доцільності впровадження нових схем кріплення (фіксації) та розміщення продукції металургійного виробництва в кузові вантажного вагону під нову номенклатуру вантажів. Крім того з метою підвищення надійності та безпеки перевезення вантажу автором вдосконалено існуючу модель просторових коливань вантажних вагонів для розрахунків інерційних сил та сумарних навантажень на кузов під час транспортування великовагового вантажу.

В дисертаційній роботі проаналізовано сучасний стан справ у галузі перевезень залізничним транспортом в Україні. Автор прослідкував зростаючу тенденцію перевезення вантажу металургійного виробництва в конкретних типах вагонів, а саме в універсальних платформах та піввагонів, через їх поширеність на відмінну від спеціалізованого рухомого складу. Також зазначено продовження строку служби вантажних вагонів через недотримання програми оновлення вантажного парку вітчизняних залізниць, котре могло підвищити динамічні якості екіпажів, збільшити ресурс ходових частин й знизити знос елементів рухомого складу та колії. Окремий вплив на поточний стан залізниці також має повномасштабне вторгнення країни агресора в Україну, через що втрачається як особовий так і рухомий склад залізниці. Проведене дослідження підтверджує високу актуальність проблеми підвищення надійності та міцності кузовів вантажних вагонів під час перевезення металургійної продукції з врахуванням широкого спектру факторів, які впливають як на безпеку руху, так і на економічну ефективність залізничних перевезень. Аналіз схем розміщення

та фіксації вантажів у піввагонах демонструє застосування різноманітних підходів до їхньої фіксації та розташування.

В роботі досліджені існуючі математичні моделі просторових коливань вантажного вагону при взаємодії рухомого складу із рейковою колією. Аналіз відкритих вітчизняних та зарубіжних джерел свідчить про тенденцію до ускладнення математичних моделей і впровадження методів розв'язання, що забезпечують більш повне врахування характеристик об'єкта дослідження, які проявляються в умовах реальної експлуатації залізничних екіпажів. Попри значну кількість досліджень та вагомий внесок вітчизняних і зарубіжних науковців, проблема підвищення міцності вантажних вагонів під час перевезення металургійної продукції залишається надзвичайно актуальною. Для вітчизняних залізниць характерною особливістю взаємодії рухомого складу з рейковою колією є інтенсивне зношення колісно-рейкової пари на ділянках з кривими малого радіусу. Виникла необхідність розробки математичної моделі просторових коливань суттєво нелінійної системи «екіпаж–колія», що враховує конструктивні особливості вантажних вагонів та зміщення центру ваги вантажу. Дослідження впливу конструктивних параметрів вантажних вагонів і зміщення центру ваги вантажу на їх міцність є важливим кроком для вдосконалення нормативних вимог до розміщення та фіксації металургійних вантажів.

В дисертаційній роботі автор розглядає реальну транспортну подію, котра сталася в липні 2020 року на перегоні «Воскобійна-Верхньодніпровськ» регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця», яка наглядно демонструє втрату міцності кузова при зміщенні центру ваги вантажу металургійного виробництва (бунти катаного дроту), що привело до пошкодження вантажного вагону, яка стала передумовою виникнення теми досліджень. Основною причиною аварійної ситуації визначено відокремлення бокової стінки кузова вагона (з подовженим терміном експлуатації) від кутових стояків, що призвело до деформації проміжних поперечних балок та подальшого руйнування зварних з'єднань з усіма поперечними елементами конструкції під дією навантаження від вантажу. Як альтернативну версію розглядалось перевищення поперечного навантаження на бокову стінку вагона, що могло бути

зумовлене помилками у розрахунках під час проектування схеми розміщення вантажу.

У дисертації розроблено підхід до кількісної оцінки міцності кузова на основі аналізу динамічних навантажень у зонах концентрації напружень. Запропоновано нові критерії граничного стану для елементів рами вагона, а також встановлено залежність рівня напружень від величини та напрямку зміщення центра мас. У результаті дослідження розроблено технічні рекомендації щодо допустимих меж зміщення вантажу та відповідні варіанти його розміщення у кузовах піввагонів.

Відповідно до теми дослідження автором запропоновано удосконалення математичної моделі просторових коливань вантажного вагону при повздовжньо-поперечному зміщенні вантажу металургійного виробництва. При дослідженні просторових коливань вантажного вагону автор передбачив, що вагон має одноступінчасте ресорне підвішування, та складається з дванадцяти твердих тіл: великовагового вантажу, кузова, двох надресорних балок, чотирьох бокових рам та чотирьох колісних пар. Схема рами візка передбачалась шарнірною. Також було враховано пружно-в'язкі та інерційні властивості основи залізничної колії у вертикальній та горизонтальній площині. Наведено методику визначення зусиль та оцінки міцності кузова вантажного вагону при перевезенні продукції металургійного виробництва. Визначені питомі інерційні сили та сумарні навантаження для оцінки міцності кузова вантажного вагону. Проаналізовано вплив великовагового вантажу на основні складові частини вантажного рухомого складу. Отримані результати відповідають реальному об'єкту за рахунок забезпечення розрахунків до затвердженої методики. Для визначення розпірних сил від дії бунтів катаного дроту верхнього та нижнього ярусу відповідно до представлених в роботі розрахункових схем прописувалися та вирішувалися рівняннями рівноваги сил.

Проведено порівняння отриманих розрахунків з результатами існуючого експерименту. Співставлення результатів ходових випробувань з мінімальними та максимальними значеннями моделювання рамних сил і кутів впливання надресорної балки щодо кузова вантажного вагону показали збіжність з

теоретичними розрахунками. Наведено порівняльний аналіз коефіцієнтів динамічної добавки необресорених мас, визначених за результатами експериментальних випробувань та аналітичного моделювання. Отримані результати засвідчили задовільну відповідність при русі вантажного рухомого складу по криволінійних ділянках колії. Порівняння результатів моделювання з аналогічними величинами параметрів, отриманих під час проведення динамічних ходових випробувань, дозволили зробити висновок про адекватність удосконаленої математичної моделі. Запропонована модель взаємодії рухомого складу з гнучким кузовом та колією також дозволяє зменшити об'єм задіяних обчислювальних можливостей при збереженні точності результатів.

Визначено економічну ефективність впровадження удосконаленої математичної моделі оцінки міцності вантажних вагонів. Запропонована модель враховує повздовжньо-поперечні переміщення центру ваги вантажу в кузові вантажного вагону, що дозволяє точніше оцінити навантаження на несучі елементи конструкції вантажного вагону і, як наслідок, знизити ймовірність його пошкодження під час перевезень вантажу металургійного виробництва. В розрахунках використовувалися дані з джерела про кількість пошкоджених вантажних вагонів за рік до та після впровадження нової методики оцінки кузовів рухомого складу. Пошкодження вантажних вагонів зменшилось майже на 30%, що дозволило поррахувати щорічну економію на ремонт рухомого складу, яка склала 1,6 млн грн.

Результати дисертаційної роботи є вагомим внеском у підвищенні надійності перевезень вантажу металургійного виробництва залізничним транспортом та можуть бути використані при проектуванні нових типів вантажних вагонів, розробці технічних умов перевезення, а також у процесі підготовки фахівців залізничного транспорту.

Ключові слова: Оцінка міцності, вантажний вагон, математична модель, вантаж металургійного виробництва, центр ваги, зміщення вантажу.

## **ABSTRACT**

Shvets A. O. Improving the method for assessing the strength of freight cars during the transportation of metallurgical cargo.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 273 – Railway Transport. Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The main goal of the scientific results of the dissertation work, obtained by the author and constituting scientific novelty, is the feasibility of implementing new schemes for fastening and placing metallurgical products in the body of a freight car for a new nomenclature of goods. In addition, in order to increase the reliability and safety of cargo transportation, the author improved the existing model of spatial oscillations of freight cars for calculating inertial forces and total loads on the body during the transportation of heavy cargo.

The dissertation analyzed the current state of affairs in the field of railway transportation in Ukraine. The author traced the growing trend of transporting metallurgical cargo in specific types of cars, namely universal platforms, and gondolas, due to their prevalence contrary to specialized rolling stock. It was also noted that the service life of freight cars had been extended due to non-compliance with the program for updating the freight fleet of domestic railways, which could have improved the dynamic qualities of crews, increased the resource of running gear, and reduced wear and tear of rolling stock and track elements. The full-scale invasion of Ukraine by an aggressor country also had a separate impact on the current state of the railway, which resulted in the loss of both personnel and rolling stock. The conducted study confirms the high relevance of the problem of increasing the reliability and strength of freight car bodies during the transportation of metallurgical products, taking into account a wide range of factors that affect both traffic safety and the economic efficiency of railway transportation. Analysis of cargo placement and securing schemes in gondola cars demonstrated the use of various approaches to their fixation and location.

The paper investigated existing mathematical models of spatial oscillations of a freight car during the interaction of rolling stock with a rail track. Analysis of open

domestic and foreign sources indicated a tendency to complicate mathematical models and implement solution methods that provide a more complete account of the characteristics of the object of study that manifest themselves in the conditions of real operation of railway crews. Despite a significant amount of research and contributions from domestic and foreign scientists, the problem of increasing the strength of freight cars during the transportation of metallurgical products remains extremely relevant. For domestic railways, a characteristic feature of the interaction of rolling stock with the rail track is the intensive wear of the wheel-rail pair on sections with small-radius curves. There was a need to develop a mathematical model of spatial oscillations of the significantly nonlinear "crew-track" system, which takes into account the design features of freight cars and the displacement of the center of gravity of the cargo. Research into the influence of the design parameters of freight cars and the displacement of cargo's center of gravity on their strength is an important step toward improving regulatory requirements for the placement and securing of metallurgical cargo.

In the dissertation, the author examined a real transport event that occurred in July 2020 on the Voskoboynya – Verkhnedneprovsk section of the regional branch of the Pridneprovskaya Railway of JSC Ukrzaliznytsia, which clearly demonstrated the loss of body strength when the center of gravity of the metallurgical cargo (rolled wire coils) shifted, which led to damage to the freight car and became the prerequisite for the emergence of the research topic. The main cause of the emergency situation was determined to be the separation of the side wall of the car body (with an extended service life) from the corner uprights, which led to the deformation of the intermediate cross beams and the subsequent destruction of the welded joints with all transverse structural elements under the action of the load from the cargo. The excess of the transverse load on the side wall of the wagon was considered as an alternative explanation, which could have been caused by errors in calculations during the design of the cargo placement scheme.

The dissertation developed an approach to quantitative assessment of body strength based the analysis of dynamic loads in stress concentration zones. New limit state criteria for the elements of the car frame are proposed, and the dependence of the

stress level on the magnitude and direction of the center of mass displacement is established. As a result of the study, technical recommendations have been developed regarding the permissible limits of cargo displacement and the corresponding options for its placement in the bodies of gondola cars.

In accordance with the topic of the study, the author proposed an improvement of the mathematical model of spatial vibrations of a freight car during longitudinal-transverse displacement of a metallurgical production cargo. When studying the spatial vibrations of a freight car, the author assumed that the car had a single-stage spring suspension and consisted of twelve rigid bodies: a heavy load, a body, two super-spring beams, four side frames, and four-wheel pairs. The bogie frame scheme was assumed to be hinged. The elastic-viscous and inertial properties of the railway track base in the vertical and horizontal planes were also taken into account. A method for determining the forces and assessing the strength of the freight car body when transporting metallurgical products was presented. Specific inertial forces and total loads were determined to assess the strength of the freight car body. The impact of heavy cargo on the main components of freight rolling stock was analyzed. The results obtained correspond to the real object due to the calculations being carried out according to the approved methodology. To determine the expansion forces from the action of the rolled wire coils of the upper and lower tiers, in accordance with the calculation schemes presented in the work, the force equilibrium equation was composed and solved.

The obtained calculations were compared with the results of the existing experiment. A comparison of the results of running tests with the minimum and maximum values of the simulation of frame forces and the yaw angles of the upper spring beam relative to the freight car body showed the convergence of the theoretical calculations. A comparative analysis of the coefficients of dynamic addition of unsprung masses, determined by the results of experimental tests and analytical modeling, was presented. The results obtained showed satisfactory compliance when freight rolling stock moved along curved sections of the track. A comparison of the simulation results with similar parameter values obtained during dynamic running tests allowed us to conclude that the improved mathematical model was adequate. The proposed model of interaction of rolling stock with a flexible body and track also

allowed for the amount of computational resources involved while maintaining the accuracy of the results to be reduced.

The economic efficiency of implementing an improved mathematical model for assessing the strength of freight cars was determined. The proposed model takes into account the longitudinal and transverse movements of the center of gravity of the cargo in the body of the freight car, which allows for a more accurate assessment of the load on the load-bearing elements of the freight car structure and, as a result, reduce the likelihood of its damage during the transportation of metallurgical cargo. The calculations used data from the source on the number of damaged freight cars for the year before and after the implementation of the new methodology for assessing rolling stock bodies. Freight car damage decreased by almost 30%, which allowed for calculating annual savings on rolling stock repairs, which amounted to 1.6 million UAH.

The results of the dissertation work are a significant contribution to increasing the reliability of transportation of metallurgical cargo by rail and can be used in the design of new types of freight cars, the development of technical conditions for transportation, and the process of training railway transport specialists.

**Keywords:** Strength assessment, freight car, mathematical model, metallurgical production cargo, center of gravity, cargo displacement, inertial forces.