

O.Fomin¹
 O.Burlutskiy²
 A. N. Fomina³,
 O. Y. Burlutskay²

FORMATION OF GRADIENT NANOSTRUCTURES ON THE SURFACE OF PARTS BY SHOT BLASTING

¹ National Transport University

² National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'

³ Priazovskiy State Technical University,

Abstract The article presents the results of experimental studies of the impact of long-term operation (over 20 years) on the load-bearing capacity of freight cars. It has been established that the degradation of 09G2S steel manifests itself in a critical decrease in impact toughness (to 7–40 J/cm² at -40°C) while maintaining standard strength indicators. A finite element model has been developed and verified by field tests with an error of up to 10%. The need to adjust the standard reserve coefficients for wagons with an extended service life has been substantiated.

Keywords: transport technologies; repair; freight car; computer modeling; body frame; center sill; impact tests; material characteristics; residual service life; steel degradation.

Анотація У статті представлено результати експериментальних досліджень впливу тривалої експлуатації (понад 20 років) на несівну здатність вантажних вагонів. Встановлено, що деградація сталі 09Г2С проявляється у критичному зниженні ударної в'язкості (до 7–40 Дж/см² при -40°C) при збереженні нормованих показників міцності. Розроблено скінченно-елементну модель, верифіковану натурними випробуваннями з похибкою до 10%. Обґрунтовано необхідність коригування нормативних коефіцієнтів запасу для вагонів з подовженим терміном служби.

Ключові слова: транспортні технології; ремонт; вантажний вагон; комп'ютерне моделювання; рама кузова; центральна балка; випробування на удар; характеристики матеріалів; залишковий термін експлуатації; деградація сталі

Introduction

The current state of the freight car fleet is characterized by a critical level of wear and tear, which threatens the safety of transportation. The main problem is the lack of accurate methods for assessing the technical condition of load-bearing systems that would take into account the physicochemical degradation of the metal. During long-term operation, frame and body materials are exposed to corrosion, fatigue and cyclic temperature changes. This leads to a change in the yield strength, plasticity and toughness of steel, which is not taken into account in the passport characteristics of the car.

Research results

The calculation was carried out using the finite element method. The finite element model of the supporting structure of the gondola is shown.



Fig.1 Cross-section layout and location strain gauges on gondola elements

Based on the analysis of the maximum stresses in the transverse beams of the gondola frame, the following conclusions can be drawn:

- In the range from 0.4 to 0.8 MN The highest stresses occur in the end beams — 59.3 MPa (loaded), in the pivot beams — 63.6 MPa (loaded), in the fourth transverse beam — 84.7 MPa (loaded).
- In the range from 1.2 to 1.6 MN The highest stresses occur in the end beams — 115.6 MPa (loaded), in the pivot beams — 115.9 MPa (loaded), in the fourth transverse beam — 153.9 MPa (empty).
- In the range from 0 to 0.4 MN The highest stresses occur in the end beams — 31.3 MPa (loaded), in the pivot beams — 36.9 MPa (loaded), in the fourth transverse beam — 54.2 MPa (loaded).

As the impact force increases, the stresses in the crossbeams increase more in the empty mode than in the loaded car. The maximum stresses in the collision in the empty state occur in the fourth and third crossbeams, and in the loaded mode - in the third and second crossbeams.

In the range from 0.8 to 1.2 MN The highest stresses occur in the end beams — 88.1 MPa (loaded), in the pivot beams — 89.5 MPa (loaded), in the second transverse beam — 116.9 MPa (loaded).

In order to determine the strength of the structure when struck with a force of 3.5 MN, the test was carried out during daylight hours. On two parallel tracks specially prepared for the experiment, 29 strain gauges were installed to record deformations at control points. The sensor layout is shown in Figures 2



Fig. 2– Installation locations of strain gauges on the supporting elements of the experimental gondola [3]

To compare the results obtained from the geometric model with the results of experimental tests, control points were selected in the areas that underwent improvement. Their numbers corresponded to the arrangement of strain gauges on the connecting beam (Equivalent stresses for design modes I and III are given in Table 1.

Table 1 - Comparative analysis of equivalent stresses in a transverse beam [4]

| Point | Stress during calculation, MPa | Test stress, MPa | Difference, % |
|-------|--------------------------------|------------------|---------------|
| 17 | 44.3 | 39.9 | 8,25 |
| 23 | 50.7 | 45.6 | 9,89 |
| 24 | 54.9 | 49.4 | 10,02 |
| 26 | 44.3 | 39.9 | 9,86 |
| 29 | 50.7 | 45.6 | 9,26 |

Conclusions

Studies confirm that after 25 years of service, steel plasticity drops by 15–20%, increasing the risk of brittle failure. Corrosive and fatigue processes act together, especially in pivot beams with high stress concentration. For wagons over 20 years old, more frequent flaw detection is advised.

After 30 years, the endurance limit of 09G2S steel decreases by 10–15%, and impact toughness at subzero temperatures halves. The degradation models are reliable (error $\leq 8\%$). Field tests validate the findings, which have been well received by industry experts.

REFERENCE

1. Порядок проведення комплексу діагностичних, ремонтних та реєстраційних операцій, спрямованих на продовження строку експлуатації вантажних вагонів (крім вантажних вагонів підприємств технологічного залізничного транспорту, що призначені для переміщення вантажів у виробничих цілях в межах території таких підприємств), установленого виробником, затверджено наказом Міністерства інфраструктури України від 30 листопада 2021 року № 647, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 28 грудня 2021 року за № 1677/37299. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1677-21#Text>

2. Fomin O.V., Burlutskiy O.V., Kulbovskiy I.I., Veremeienko L.A., (2025) Modelling and prevention of corrosion in load-bearing elements of freight cars, *Municipal economy of cities. Series: technical sciences and architecture*, Volume № 3 Issue (191), P.597-605. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-597-605>

3. Фомін О.В., Прокопенко П. М., Бурлуцький О.В., Фоміна А.М. Контрольні випробування вантажного вагона з метою оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій, «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 30 (69) № 3, 2019, С. 177-182. : <https://doi.org/10.32838/2663%2D5941/2019.3%2D2D31>

4. O.V. Fomin , O.V. Burlutskiy , A. N. Fomina , O. Y. Burlutskay , (2026) Experimental studies of non-weighing systems of freight cars taking into account the degradation of material properties after long-term operation0 *Municipal Services in Cities. Series: Information Technology and Engineering*, Volume № 8 Issue (196), P.597-605

Fomin Oleksii Victorovich. —Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Railway Cars and Structures, Kyiv Institute of Railway Transport, National Transport University , fominaleksejvictorovic@gmail.com

Burlutskiy Oleksii Victorovich —PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Modelling and Integrated Pressure Treatment Technologies, National Technical University ‘Kharkiv Polytechnic Institute’, Oleksij.Burlutskiy@khp.edu.ua

Fomina Anna Nikolaevna —PhD, Senior Lecturer, Department of Automotive Transport. Priazovsky State Technical University, fomina_a_n@pstu.edu

Burlutska Oksana Yurievna — 2nd (master's) level student. National Technical University ‘Kharkiv Polytechnic Institute’ Oksana.Burlutska@mit.khp.edu.ua

Фомін Олексій Вікторович — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вагонів та споруд залізничного транспорту Київського інституту залізничного транспорту Національного транспортного університету, fominaleksejvictorovic@gmail.com

Бурлуцький Олексій Вікторович — кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Oleksij.Burlutskiy@khp.edu.ua

Фоміна Анна Миколаївна — кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобільного транспорту. Приазовський державний технічний університет, fomina_a_n@pstu.edu

Бурлуцька Оксана Юріївна — студентка 2-го (магістерського) рівня. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Oksana.Burlutska@mit.khp.edu.ua