

УДК 629.463.001.63

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ПРАВКИ
БАЛКИ ХРЕБТОВОЇ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ-ПЛАТФОРМ****Фомін О.В., Логвіненко О.А., Бурлуцький О.В, Шелест Д.А., Фоміна А.М.****MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF THERMAL EDITING
OF THE RACK OF RACKS CARGO WAGONS-PLATFORMS****Fomin O.V., Logvinenko O.A., Burlutskiy O.V., Shelest D.A., Fomina A.M.**

Виділено роль залізничного транспорту в транспортній системі України. Відмічено, що одним із ключових моментів забезпечення високого рівня продуктивності роботи залізниць є застосування більш економічних технологій виробництва та ремонту вантажних вагонів. Зазначена актуальність використання методу термічної правки для усунення експлуатаційних деформацій хребтової балки вагонів-платформ. Наведені 3D моделі балки хребтової, які було побудовано в програмному комплексі SolidWorks. Представлений математичний план досліджень та отримана відповідна математична модель. Наведені результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової, яке було проведено за допомогою спеціалізованого модуля Cosmos що входить до складу програмного комплексу SolidWorks.

Ключові слова: залізничний транспорт, вагон-платформа, балка хребтова, експлуатаційні деформації, термічна правка, математична модель, 3D моделювання.

Вступ. Особлива роль в транспортній системі України відводиться залізничному транспорту, який є однією з важливих базових галузей економіки країни та забезпечує її внутрішні та зовнішні транспортно-економічні зв'язки і потреби населення у перевезеннях. Діяльність залізничного транспорту як частини єдиної транспортної системи країни сприяє нормальному функціонуванню всіх галузей суспільного виробництва, соціальному і економічному розвитку та зміцненню обороноздатності держави, міжнародному співробітництву України. Він поєднує у собі важливі техніко-економічні показники: регулярність руху і високу швидкість перевезень, велику пропускну і провізну спроможність [1 - 3].

Постановка проблеми. Збереження провідного місця залізниць при перевезеннях вантажів вимагає постійного поліпшення ефективності їх функціонування. Одним із ключових моментів забезпечення високого рівня продуктивності роботи залізниць є застосування більш економічних технологій виробництва та ремонту вантажних вагонів [3,4 - 6]. Це пов'язано з тим, що найбільший відсоток усіх пере-

везень, які здійснюються залізничним транспортом, припадає на вантажні перевезення. Тому особливої уваги заслуговують питання щодо підтримки існуючого вантажного вагонного парку в належному працездатному стані [7 - 9]. Вказане можливо досягнути за рахунок створення нових або модернізації існуючих вантажних вагонів. Отже особливої актуальності заслуговують питання стосовно підвищення технічного рівня вантажних вагонів за рахунок застосування нетрадиційних матеріалів з більш високими стійкими характеристиками, нових методів зварювання, а також прогресивних технологічних процесів, як при їх виготовленні так і експлуатації [10 - 14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на етапах життєвого циклу вантажних вагонів (при виготовленні, ремонтах та експлуатації) їх конструкції є недосконалими та зазнають різних видів деформацій [15 - 17].

Пошук шляхів протидії виникненню деформацій конструкцій вантажних вагонів (зокрема і вагонів-платформ, які забезпечують перевезення великотоннажних вантажів, а також вантажів що мають велику довжину і не потребують укриття та захисту від дії атмосферного середовища) та ефективного їх виправлення є важливою науково-прикладною проблемою. Сказане обґрунтовується прямим зв'язком зменшення деформацій вагонних конструкцій з підвищенням рівня безпеки руху та збереження вантажів при транспортуванні [18]. Тому цим питанням приділяється особлива увага як в науковій діяльності так і при практичній реалізації її результатів. Відповідно постійно проводяться науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи скеровані на удосконалення методів виправлення деформацій елементів одиниць рухомого складу за рахунок впровадження різних технологічних підходів та технічних рішень.

Як показав проведений авторами аналіз експлуатаційних пошкоджень несучих елементів вагонів-

платформ основними з них є експлуатаційні деформації хребтових балок, які виникають внаслідок перевищення допустимих навантажень з боку вантажів, що перевозяться. На даний час традиційним способом усунення зазначених деформацій є холодна правка, яка полягає в пластичному деформуванні деталей в холодному стані та вимагає великих зовнішніх зусиль. Але однією з найбільш раціональних та економічно-доцільних з точки зору стабілізації форм елементів конструкції вагонів є процедура правки термічним впливом, яка полягає в місцевому високотемпературному нагріванні відповідних зон елементів за допомогою газокисневого полум'я або електричної дуги та призводить до виправлення виникаючих прогинів. Отже вказана правка представляє собою термічну обробку, під якою розуміють процеси, що полягають в тепловому впливі за певними режимами, з метою зміни структури та властивостей матеріалу. Основною перевагою цього виду правки є її універсальність, тобто з її допомогою можливо виправити будь-яку зварювальну металоконструкцію, яка має складну конфігурацію та габарити (наприклад хребтову балку вагону-платформи).

Метою статті є викладення результатів, щодо математичного моделювання процесу термічної правки балки хребтової вантажних вагонів-платформ.

Викладення основного матеріалу. Проведені авторами пошукові наукові дослідження в напрямку вибору найбільш економічного та ефективного методу стабілізації форм каркасних елементів вантажних вагонів та отримані при цьому результати, підтвердили доцільність застосування термічної правки для виправлення прогинів, що виникають в процесі виготовлення та експлуатації вагонів, зокрема вагонів-платформ. Щоб дослідити процеси які відбуваються при експлуатації каркасних елементів вагонів-платформ авторами було побудовано в програмному комплексі SolidWorks 3D модель балки хребтової (рис. 1). В ході експлуатації вагонів-платформ внаслідок перевищення допустимих навантажень на хребтову балку з боку вантажів, що перевозяться, на ній фіксується викривлення осьової осі (тобто з'являється експлуатаційний прогин Δu) (див. рис. 2).

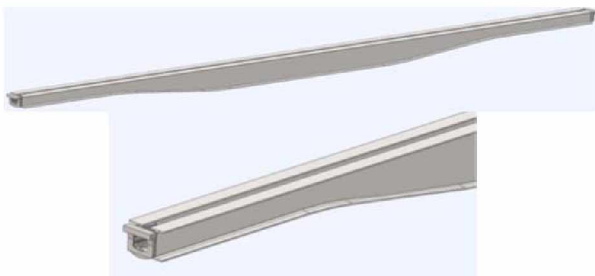


Рис. 1. Балка хребтова

На рис. 4 та рис. 5 в якості прикладу наведені математичний план дослідження (з визначеними коефіцієнтами відповідних макромоделей) для нормованих та дійсних параметрів, який було отримано з

використанням методу математичного планування експерименту, а також допоміжний графік з нанесеними на ньому ізолініями відповідних значень прогинів.

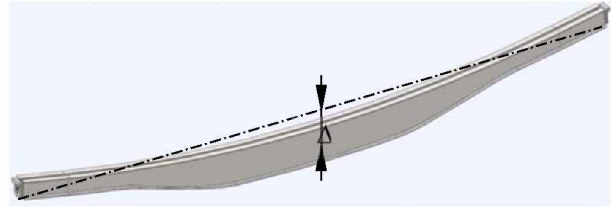


Рис. 2. Балка хребтова з експлуатаційною деформацією

Виконані авторами дослідження показали, що для усунення прогинів балки хребтової (які виникають в процесі її експлуатації) доцільно використовувати поперечне скорочення металу, а в якості форми плям нагріву обрати «клин».

На рис. 3 представлені результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової яке було проведено за допомогою спеціалізованого модуля Cosmos що входить до складу програмного комплексу SolidWorks. Як видно з рисунку використання процедури термічної правки дозволяє усунути прогини, які виникають в процесі експлуатації. В свою чергу основною складністю використання вищезначеного методу правки є обґрунтований вибір оптимальних розмірів плям та режимів нагрівання. Для їх визначення авторами було проведено математичне моделювання процесу термічної правки балки хребтової та розроблені відповідні математичні моделі.

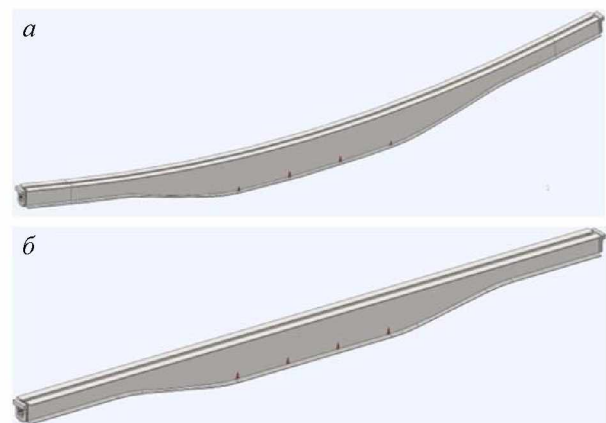


Рис. 3. Балка хребтова до процедури термічної правки (а) та після (б)

Також нижче наведена розроблена авторами трифакторна узагальнена математична модель (представлена у вигляді поліному другого ступеня та отримана з використанням методу математичного планування експерименту), яка описує зміну основного показника (прогину Δu балки хребтової) в залежності від варіювання керованих змінних (геомет-

ричних параметрів «клина» – ширини b та висоти h , а також температури нагрівання t)

$$\Delta y = -8911,18589 - 48,61353 \cdot b + 47,09803 \cdot h + 26,56882 \cdot t + 0,49441 \cdot b^2 - 0,11064 \cdot h^2 - 0,01642 \cdot t^2 - 0,08248 \cdot b \cdot h - 0,03352 \cdot b \cdot t - 0,02650 \cdot h \cdot t.$$

А	В	С	Д	Е	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н	О	П	Q
1	143,93														
2	143,93	214,93													
3	143,93	163,91													
4	143,93	163,92													
5	143,93	163,92													
6	143,93	163,92													
7	143,93	163,92													
8	143,93	163,92													
9	143,93	163,92													
10	143,93	163,92													
11	143,93	163,92													
12	143,93	163,92													
13	143,93	163,92													
14	143,93	163,92													
15	143,93	163,92													
16	143,93	163,92													
17	143,93	163,92													
18	143,93	163,92													
19	143,93	163,92													
20	143,93	163,92													
21	143,93	163,92													
22	143,93	163,92													
23	143,93	163,92													
24	143,93	163,92													
25	143,93	163,92													
26	143,93	163,92													
27	143,93	163,92													
28	143,93	163,92													
29	143,93	163,92													
30	143,93	163,92													
31	143,93	163,92													
32	143,93	163,92													
33	143,93	163,92													
34	143,93	163,92													
35	143,93	163,92													
36	143,93	163,92													

Рис. 4. Фрагмент програмного поля з обчислення математичної моделі зміни прогину Δy балки хребтової вагона-платформи

Перевірка точності, наведеної математичної моделі, яка була здійснена за величиною дисперсії адекватності, підтвердила її працездатність та можливість для подальшого використання.

Отже наведений вище математичний план та розроблена відповідно до нього математична модель дозволяють обґрунтовано обрати оптимальні значення геометричних розмірів «клина» та температури нагрівання, які необхідні для усунення відповідних прогинів наведеної балки хребтової вагона-платформи.

В якості прикладу на рис. 6 наведені результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової отримані з використанням модуля Cosmos програмного комплексу SolidWorks з зазначеними величинами прогинів, які необхідно усунути.

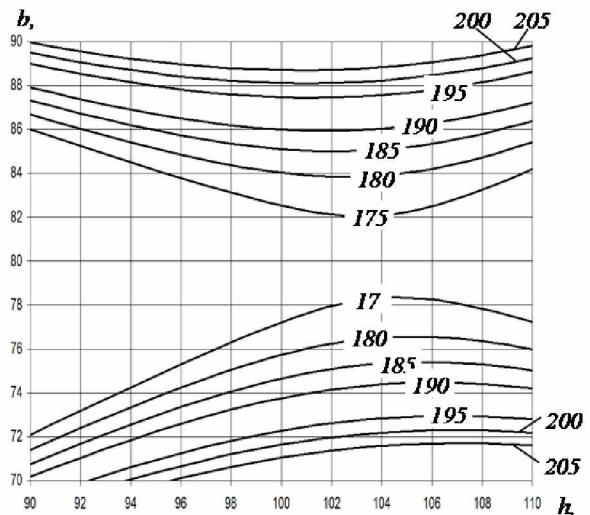


Рис. 5. Допоміжний графік до вибору розмірів «клина» для правки балки хребтової при $t = 660^\circ C$

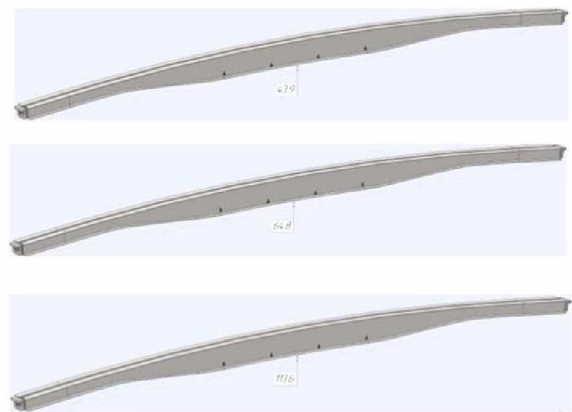


Рис. 6. Приклади математичного моделювання процесу термічної правки балки хребтової

Висновки і перспективи подальшого використання. Представлений в статті підхід, а також результати математичного моделювання термічної правки можуть бути використані фахівцями на ремонтних та вагонобудівних підприємствах Укрзалізниці при усуненні прогинів вагонних металоконструкцій, які виникають в експлуатації та при виготовленні вантажних вагонів.

Література

1. Кельріх М.Б. Структурно-функціональне описання конструкції модуля кузова сучасних універсальних напіввагонів // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2014. – №. 2. – С. 210.
2. Макаренко М.В. Комплексний аналіз економічного ефекту від життєвого циклу сучасного напіввагону // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – К.: ДНДЦ УЗ. – 2014. – №. 5. – С. 107.
3. Мороз В.І. Визначення перспективних напрямків удосконалення конструкції напіввагонів виробництва ДП

- «Укрспецвагон» // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2008. – С. 72-81.
4. Ловська А.О. Моделювання навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі / А. О. Ловська // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – 2018. – Вип. 33. – С. 28 – 32.
 5. Ловська А.О. Дослідження міцності несучої конструкції кузова напіввагона при перевезенні на залізничному поромі / А. О. Ловська // Зб. наук. праць. Київ: ДУІТ. – 2018. – Вип. 32, Т. 1. – С. 71 – 80.
 6. Gevorkyan E., Lavrynenko S., Rucki M., Siemiatkowski Z., Kislitsa M. Ceramic cutting tools out of nanostructured refractory compounds. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2017. Vol. 68. P. 142–144.
 7. Research on the safety factor against derailment of railway vehicles / S. Saponova, V. Tkachenko, O. Fomin, V. Gatchenko, S. Maliuk // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 7 (90). P. 19-25.
 8. High speed stability of a railway vehicle equipped with independently rotating wheels / O. Kyryl'chuk, J. Kalivoda, L. Neduzha // *Proc. of 24th Intern. Conf. «Engineering Mechanics 2018»*. – P. 473-476.
 9. Myamlin, S., Lunys, O., Neduzha, L., Kyryl'chuk, O. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Transport Means: Proc. of 21st Intern. Scientific Conf.*, 2017, P. 973-976.
 10. Фомін О.В. Розробка методики впровадження різних профілів в якості складових елементів несучих систем вантажних вагонів / О.В. Фомін // Вісник національного технічного університету «ХП». – Харків. – 26'2012. – С.29-33.
 11. O. Fomin, I. Kulbovskiy, E. Sorochinska, S. Saponova, O. Bambura, Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, 1 (89), 11-19, (2017).
 12. Фомін О.В. Поліпшення несучої здатності вагона-хопера для перевезення зерна з метою підвищення опору динамічним зусиллям / Фомін О.В., Прокопенко П.М., Горбунов М.І. Сапронова С.Ю. // Науковий журнал – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Северодонецьк: СХУ ім. В.Даля, 2017. – № 5(235) – С. 88-99.
 13. Fomin O.V. Варіаційне описання конструкції виконання вантажних вагонів [Variations describe the structural designs of freight cars] / O.V. Fomin, A.V. Gostra // *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series "Transport systems and technologies"*. - Kyiv: DETUT, 2015. - Vyp.26-27. - S.137-147.
 14. Мороз В.І. Математичний запис задачі оптимізаційного проектування напіввагонів за критерієм мінімальної матеріалоемності. // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – С. 121 – 131.
 15. Fomin A. V. The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building / A. V. Fomin // *East European journal of advanced technologies*. – Kharkiv. – № 3/7(57), 2012. – 32-35 p.
 16. Фомін О.В. Теоретичні основи програмного комплексу визначення та використання математичних моделей складових вантажних вагонів / О.В. Фомін // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук: КДПУ, 2013. - Вип. 6(83). – С. 87-91.
 17. Фомін О.В. Впровадження круглих труб в несучі системи напіввагонів з забезпеченням раціональних показників міцності / О.В. Фомін // Науковий журнал – «Технологический аудит и резервы производства». – Харків, 2015. – № 4/1(24) – С. 83-89.
 18. Fomin O.V., Lovska A.O., Plakhtii O.A., Nerubatskyi V. P. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties // *Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 89 – 96. (2017).
- ### References
1. Kelrikh M.B., Moroz V.I. Structural-functional description of the body module design of modern universal on-semi-cars // *Bulletin of the East-Ukrainian National University named after. V. Dahl - Lugansk: SNU them. V. Dahl* - 2014. - No. 2. - P. 210.
 2. Makarenko M. V. Comprehensive analysis of the economic impact of the life cycle of a modern gondola // *Naukovo-praktychnyizhurnal «Zaliznychnyi transport Ukrainy»*. – Kyiv: DNDTs UZ. – 2014. – №. 5. – С. 107.
 3. Moroz V.I. Determination of promising directions for the construction of gondola wagons produced by SE "Ukrspetsvagon" // *Sb. sciences works - Kharkiv: UkrDazt*. - 2008. - P. 72-81.
 4. Lovs'ka A. O. Modeling of load-carrying capacity of container-tank-containers during transportation in a combined train on a railway ferry / A.O. Lovs'ka // *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: Dynamics and durability of machines. - 2018. - Vyp. 33. – P. 28-32.
 5. Lovs'ka A.O. Investigation of the durability of the bearing structure of the gondola body during transportation on the railway ferry / A.O. Lovs'ka // *Sb. sciences works Kyiv: DUIT*. - 2018. – Vyp. 32, Т. 1 - P. 71-80.
 6. Gevorkyan E., Lavrynenko S., Rucki M., Siemiatkowski Z., Kislitsa M. Ceramic cutting tools out of nanostructured refractory compounds. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2017, №68, P. 142–144.
 7. Saponova S., Tkachenko V., Fomin O., Gatchenko V., Maliuk S. Research on the safety factor against derailment of railway vehicles. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2017, №6,7 (90), P. 19-25.
 8. Kyryl'chuk O., Kalivoda J., Neduzha L. High speed stability of a railway vehicle equipped with independently rotating wheels. *Engineering Mechanics: Proc. of 24th Intern. Conf.*, 2018, P. 473-476.
 9. Myamlin S., Lunys O., Neduzha L., Kyryl'chuk O. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Transport Means: Proc. of 21st Intern. Scientific Conf.*, 2017, P. 973-976.
 10. Fomin O.V. Development of a method for the introduction of various profiles as components of carrier systems of freight cars / O.V. Fomin // *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. - Kharkiv - 26'2012. - P. 29-33.
 11. Fomin O., Kulbovsky I., Sorochinska E., Saponova S., Bambura O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, №5 (1 (89)), P. 11–18.
 12. Fomin O.V. Improvement of the carrier capacity of the hopper car to transport the grain in order to increase re-

- sistance to dynamic effort / Fomin O.V., Prokopenko P.M., Gorbunov M.I. Sapronova S.Yu. // Scientific Journal - The Bulletin of the Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University. - Severodonetsk: SNU them. V. Dalya, 2017. - No. 5 (235) - P. 88-99.
13. Fomin, O.V. Variations describe the structural designs of freight cars / O.V. Fomin, A.V. Gostra // Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series "Transport systems and technologies." - Kyiv: DETUT, 2015. - Вып.26-27. - P.137-147.
 14. Moroz V.I. Mathematical notation of problem of optimizing design of open goods wagons by criterion of the minimum material capacity // Collection of scientific papers. Kharkiv. Ukrainian State University of Railway Transport. 2009. No 111, P. 121-131.
 15. Fomin A.V. The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building / A.V. Fomin // East European journal of advanced technologies. - Kharkiv. - № 3/7(57), 2012. - P. 32-35.
 16. Fomin O.V. Theoretical foundations of the software complex for the determination and use of mathematical models of freight wagons components / O.V. Fomin // Scientific journal "Bulletin of the Kremenchug Mykhaylo Ostrogradsky National University". - Kremenchuk: KDPU, 2013. - Vip. 6 (83). - P. 87-91.
 17. Fomin O.V. Providing round pipes in unsupported systems and wagons on rational shows / O.V Fomin // Science journal - "Technological audit and production reserves". - Kharkiv, 2015. - № 4/1 (24) - P. 83-89.
 18. Fomin O.V., Lovska A.O., Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. Scientific Bulletin of National Mining University, 2017, № 6, P. 89 – 96.

Фомин А.В., Логвиненко А.А., Бурлуцкий А.В., Шелест Д.А., Фомина А.Н. Математическое моделирование процесса термической правки балки хребтовой грузовых вагонов-платформ.

Выделена роль железнодорожного транспорта в транспортной системе Украины. Обоснована актуальность повышения технического уровня грузовых вагонов за счет использования прогрессивных технологических процессов их изготовления и ремонта. Отмечена целесообразность использования метода термической правки для устранения эксплуатационных деформаций конструктивных элементов вагонов-платформ. Представлены 3D модели балки хребтовой вагона-платформы, построенный математический план исследований, полученная математическая модель, а также результаты моделирования процесса термической правки балки хребтовой

вагона-платформы, который проводился с использованием специализированного модуля Cosmos программного комплекса SolidWorks.

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, вагон-платформа, балка хребтовая, эксплуатационные деформации, термическая правка, математическая модель, 3D моделирование.*

Fomin O.V., Logvinenko O.A., Burlutskiy O.V., Shelest D.A. Fomina A.M. Mathematical modeling of the process of thermal editing of the rack of racks cargo wagons-platforms.

The role of railway transport in the transport system of Ukraine is highlighted. It was noted that one of the key points in ensuring a high level of productivity of railways is the use of the most cost-effective technologies for the production and repair of freight cars. In this regard, special attention is paid to the maintenance of the existing car fleet in proper working condition. The relevance of raising the technical level of freight cars through the use of advanced technological processes of their manufacture and repair is substantiated. The expediency of using the method of thermal dressing to eliminate the operational deformations of the structural elements of platform cars is noted. The 3D models of the ridge car platform wagon, the constructed research plan, the obtained model, and the simulation results of the thermal editing of the ridge car platform wagon, which was carried out using the specialized Cosmos module, are presented. SolidWorks.

Keywords: *railway transport, platform car, spine beam, operational deformations, thermal straightening, mathematical model, 3D modeling.*

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій, e-mail: fomin1985@list.ru.

Логвіненко Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту, e-mail: dragondaewoo@gmail.com.

Бурлуцький Олексій Вікторович – завідувач навчальними лабораторіями кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту, e-mail: leha200681@mail.ru.

Шелест Дмитро Андрійович – інженер-розробник ВО ОБЕН, м. Харків, e-mail: shelllogist@gmail.com.

Фомина Анна Миколаївна – аспірант кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет ім. В.Далія, e-mail: anyta220885@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 20.03.2019