

УДК 629.463.001.63

- О. В. Фомін, д.т.н., доцент  
(професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний  
університет інфраструктури та технологій)*
- О. В. Бурлуцький  
(завідувач навчальними лабораторіями кафедри «Механіка і проектування  
машин», Український державний університет залізничного транспорту)*
- М. І. Горбунов, д.т.н., професор  
(професор, завідувач кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт  
та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний  
університет імені В. Даля)*
- О. А. Логвіненко, к.т.н., доцент  
(доцент кафедри «Механіка і проектування машин», Український  
державний університет залізничного транспорту)*
- А. М. Фоміна (інженер філії «ПВРЗ» ПАТ «Укрзалізниця»)*

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЯМ НАГРІВУ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ПРАВЦІ  
КАРКАСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІВВАГОНІВ**

*Зазначена провідна роль залізничного транспорту у здійсненні внутрішньо- та зовнішньодержавних економічних зв'язків України. Відмічено, що на даний час актуальною та комплексною проблемою, яка постає перед залізничним транспортом, є підвищення надійності сучасного вітчизняного парку вантажних вагонів, серед яких основне місце відводиться піввагонам. Відзначено, що її вирішення можливе за рахунок удосконалення технології виробництва їх каркасних елементів. Встановлено, що найбільш економічно доцільним методом стабілізації форм каркасних елементів піввагонів при їх виготовленні є термічна правка. Показані 3D моделі балки хребтової та обв'язування верхнього піввагона, які було побудовано в програмному комплексі SolidWorks. Представлені математичні плани досліджень та отримані відповідні математичні моделі. Наведені результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової та обв'язування верхнього, яке було проведено за допомогою спеціалізованого модуля Cosmos, що входить до складу програмного комплексу SolidWorks.*

*Ключові слова: залізничний транспорт, піввагон, зварювальна операція, каркасні елементи, залишкові деформації, термічна правка, математична модель, 3D моделювання.*

**© Фомін О. В., Бурлуцький О. В., Горбунов М. І., Логвіненко О. А.,  
Фоміна А. М., 2018**

**Вступ.** Залізничний транспорт України відіграє провідну роль у здійсненні внутрішньодержавних і значну – у зовнішньодержавних економічних зв'язках України. На нього припадає основна частина вантажообороту і перевезень пасажирів. Він поєднує у собі важливі техніко-економічні показники: регулярність руху і високу швидкість перевезень, велику пропускну і провізну спроможність. До останнього часу залізниця України забезпечувала потреби економіки і населення у перевезеннях. Це досяглося, в основному, завдяки надлишку технічних потужностей, створених ще за часів СРСР за рахунок централізованого бюджетного фінансування. За останні більш ніж 20 років капіталовкладення в оновлення основних засобів відбувались виключно за рахунок власних коштів залізниць, які не дозволяють забезпечити навіть нормальне відтворення основних засобів, особливо їх активної частини – рухомого складу [1-8]. Отже через катастрофічну зношеність рухомого складу, невідповідність між придбанням і списанням вантажних та пасажирських вагонів, а також локомотивів існує загроза незабезпечення потреб промислових галузей економіки у перевезеннях як вантажів, так і пасажирів, з відповідними витратами для держбюджету, зниженням показників економічного розвитку країни.

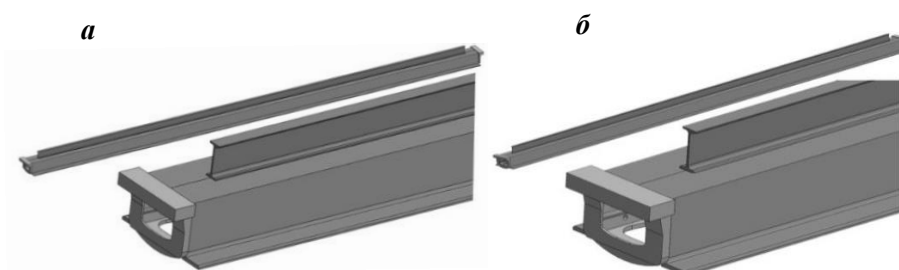
**Постановка проблеми.** В сучасних умовах господарювання, конкуренції з боку інших видів транспорту та закордонних залізничних компаній, перед вітчизняними залізницями гостро постає проблема постійного підвищення ефективності використання їх рухомого складу, переважна більшість якого припадає на вантажний вагонний парк. У зв'язку з цим підвищення надійності сучасного вітчизняного парку вантажних вагонів, серед яких основне місце відводиться піввагонам, на частку яких припадає понад третини залізничних вантажоперевезень, є актуальною та комплексною проблемою, вирішення якої тісно пов'язане з удосконаленням технології виробництва їх каркасних елементів (стійок, поясів, балок, обв'язувань тощо) [1, 4, 6-8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить, що основним технологічним процесом при виготовленні каркасних елементів піввагонів є зварювання. Проте нерівномірне нагрівання зварювальних елементів, усадка розплавленого металу шва та структурні перетворення, які навколо нього відбуваються, призводять до появи післязварювальних залишкових напружень та деформацій, які суттєво знижують якість зварних металоконструкцій. У зв'язку з цим виникає потреба в проведенні відповідних заходів щодо усунення наслідків появи залишкових напружень та деформацій і здійсненні технологічного контролю при їх виготовленні. Разом з тим, в сучасних умовах, відновлення форм зварювальних каркасних елементів піввагонів можливо досягнути за рахунок використання процедури їх правки [6-9].

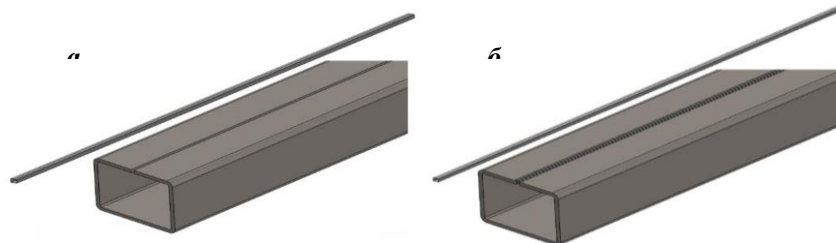
**Метою статті** є викладення результатів математичного моделювання варіаційних характеристик плям нагріву при термічній правці каркасних елементів піввагонів.

**Викладення основного матеріалу.** Як було відмічено раніше [6,7], найбільш економічно доцільним методом стабілізації форм каркасних елементів піввагонів (зокрема балки хребтової та обв'язування верхнього) при їх виготовленні є термічна правка, яка полягає в місцевому нагріванні відповідних зон елементів та призводить до виправлення прогинів, що виникають в процесі зварювання. Щоб дослідити процеси, які відбуваються при виготовленні каркасних елементів піввагонів, авторами було побудовано в програмному комплексі SolidWorks 3D моделі балки хребтової та обв'язування верхнього (див. рис. 1 та 2). Після здійснення технологічної операції зварювання відмічених каркасних елементів піввагонів у процесі остигання зварювальних швів відбувається викривлення їх осьової лінії (з'являється прогин).

Виконані авторами дослідження показали, що для усунення прогинів балки хребтової та обв'язування верхнього (які виникають після накладанні зварних швів в процесі їх виготовлення) доцільно використовувати поперечне скорочення металу, а як форми плям нагріву обрати «клин».



*Рис. 1. Балка хребтова без зварного шва (а) та із зварним швом (б)*



*Рис. 2. Обв'язування верхнє без зварного шва (а) та із зварним швом (б)*

На рис. 3 та 4 подані результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової та обв'язування верхнього, яке було проведене за допомогою спеціалізованого модуля Cosmos, що входить до складу програмного комплексу SolidWorks. Як видно з цих рисунків, використання процедури термічної правки дозволяє усунути прогини, які виникають в процесі виготовлення. В свою чергу основною складністю використання вищезазначеного методу правки є обґрунтований вибір оптимальних розмірів плям і режимів нагрівання. Для їх визначення авторами було проведене математичне моделювання процесу термічної правки балки хребтової й обв'язування верхнього та розроблені відповідні математичні моделі. Отримані при цьому з використанням методів математичного планування експерименту математичні плани досліджень та побудовані допоміжні графіки дозволяють встановити оптимальні геометричні розміри «клина» та температури нагрівання, що необхідні для усунення прогинів зазначених вище каркасних елементів піввагонів.



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

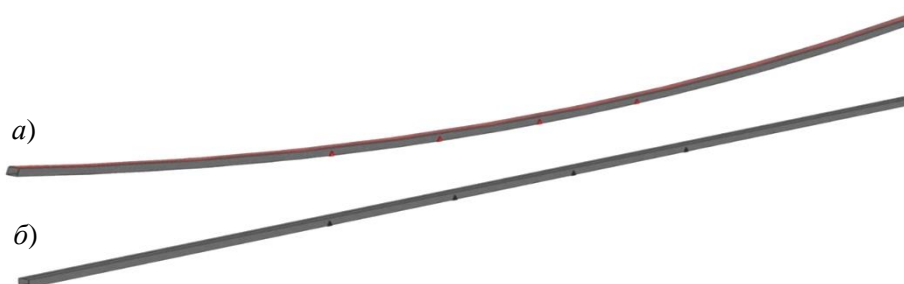


Рис. 4. Обв'язування верхнє зі зварним швом до процедури термічної правки (а) та після (б)

На рис. 5 та 6 як приклад наведені математичні плани досліджень для нормованих та дійсних параметрів, а також визначені коефіцієнти відповідних макромоделей.

Також нижче наведені розроблені авторами трифакторні узагальнені математичні моделі (представлені у вигляді поліномів другого ступеня та отримані з використанням методу математичного планування експерименту), які описують зміну основного показника (прогину  $\Delta y$  балки хребтової (1) та профілю обв'язування верхнього (2) залежно від варіювання керованих змінних (геометричних параметрів «клина» – ширини  $b$  та висоти  $h$ , а також температури нагрівання  $t$ )

$$\Delta y = 1304,30333 - 55,074 \cdot b + 25,86856 \cdot h - 0,90952 \cdot t + 0,21511 \cdot b^2 - 0,13489 \cdot h^2 + 0,00108 \cdot t^2 + 0,115 \cdot b \cdot h + 0,0056 \cdot b \cdot t - 0,00805 \cdot h \cdot t; \quad (1)$$

$$\Delta y = -1889,03858 + 25,19875 \cdot b + 18,71944 \cdot h + 2,57497 \cdot t - 0,08472 \cdot b^2 + 0,1403 \cdot h^2 - 0,00108 \cdot t^2 - 0,17688 \cdot b \cdot h - 0,00142 \cdot b \cdot t - 0,01692 \cdot h \cdot t. \quad (2)$$

Перевірка точності, наведених вище математичних моделей, яка була здійснена за величиною дисперсії адекватності, підтвердила їх працездатність та можливість для подальшого використання.



лад на рис. 7 та 8 наведені результати моделювання процесу термічної правки балки хребтової та обв'язування верхнього, отримані з використанням модуля Cosmos програмного комплексу SolidWorks з зазначеними величинами прогинів, які необхідно усунути.

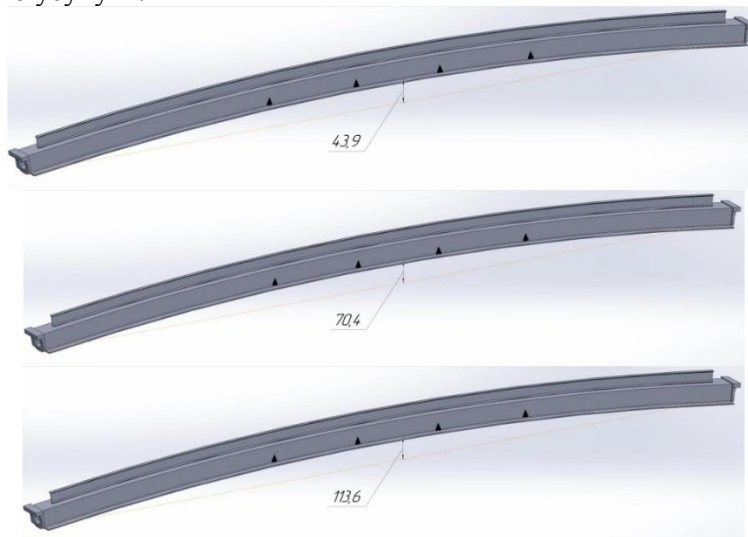


Рис. 7. Приклади математичного моделювання процесу термічної правки балки хребтової

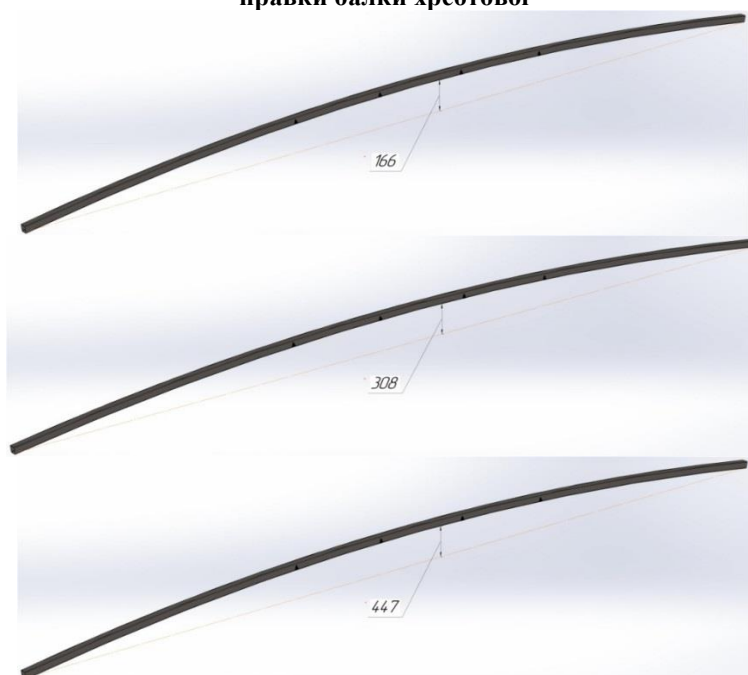


Рис. 8. Приклади математичного моделювання процесу термічної правки обв'язування верхнього

**Висновки і перспективи подальшого використання.** Представлений в статті підхід щодо усунення залишкових деформацій каркасних елементів піввагонів, які виникають при їх виготовленні, а також результати математичного моделювання

процесу термічної правки балки хребтової та обв'язування верхнього можуть бути використані фахівцями в галузі вагонобудування при виконанні технологічних операцій в рамках створення або модернізації піввагонів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фомін, О.В. Концепція ідеальних кузовів напіввагонів / О.В. Фомін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2013. – № 4(193). – С. 267–271.
2. Fomin, O.V. Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry», 2015, №. 1. – P.45-48.
3. Fomin, O.V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building / O.V. Fomin, O.V. Burlutsky, Yu.V. Fomina / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry», 2015, №. 2 – P. 250–256.
4. Фомін, О.В. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів / О.В. Фомін, О.А. Логвіненко, Р.Ю. Дьомін, Г.П. Бородай, В.В. Фомін, О.В. Бурлуцький // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – К.: ДНДЦ УЗ, 2013. – № 5/6(102/103). – С. 95–104.
5. Logvinenko, A.A. Peculiarities of stress calculation of basic parts of valve timing gear of modern locomotive electric power installations // Metallurgical and mining industry (Machine building). – Dnipropetrovsk, 2014. – №6. – P. 59-63. (www.metaljournal.com.ua).
6. Фомін, О.В. Наукове обґрунтування вибору геометричних параметрів зон нагріву при термічній правці елементів несучих систем вантажних вагонів / О.В. Фомін, О.А. Логвіненко, Бурлуцький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Науковий журнал. – Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2017. – N 4(234). – С. 227-232.
7. Фомін, О.В. Процедура правки технологічно-деформованих вагонних металоконструкцій шляхом створення внутрішнього напруженого стану термічним впливом / О.В. Фомін, О.А. Логвіненко, О.В. Бурлуцький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Науковий журнал. – Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2017. – № 3(233). – С. 234-238.
8. Фомін, О.В. Аналіз існуючих та перспективних профілів складових елементів несучих систем одиниць рухомого складу залізниць / О.В. Фомін, О.А. Логвіненко, О.В. Бурлуцький, А.М. Фоміна // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – Харків: НТУ(ХПІ), 2016. – Т. 1, № 46. – С. 66-72. – Режим доступу: DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2078-9130.2016.46.88052>.
9. Герасимов, В.С. Технология вагоностроения и ремонта вагонов: Учебник для вузов / В.С. Герасимов, И.Ф. Скиба, Б.М. Кернич и др.; Под ред. В.С. Герасимова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1988. – 381с.

### REFERENCES

1. Fomin O.V. *Kontseptsiya ideal'nykh kuzoviv napivvagoniv* [The concept of gondola cars]. *Visnyk Shkhdnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya: naukovyy zhurnal* – Bulletin of Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University: Scientific Journal, Lugansk, Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University Publ., 2013, no. 4(193), pp. 267–271.
2. Fomin O.V. Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, no. 1., pp. 45-48.
3. Fomin O.V., Burlutsky O.V., Fomina Yu.V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building // Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, no. 2, pp. 250–256.
4. Fomin O.V., Logvinenko O.A., Domin R.Yu., Fomin V.V., Boroday G.P., Burlutskiy O.V. *Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykiv bazovykh nesuchih elementiv kuzoviv napivvagoniv* [Mathematical models of the main indicators of change in the basic elements of gondolas carrying bodies]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy* – Railway transport of Ukraine, 2013, issue 5/6(102/103), pp. 95-104.
5. Logvinenko A. A. Peculiarities of stress calculation of basic parts of valve timing gear of modern locomotive electric power installations // Metallurgical and mining industry (Machine building). – Dnipropetrovsk, 2014. – No.6. – P. 59-63. (www.metaljournal.com.ua).

6. Fomin O.V., Logvinenko O.A., Burlutskiy O.V. *Naukove obgruntuvannya vyboru heometrychnykh parametriv zon nahrivu pry termichniy pravtsi elementiv nesuchykh system vantazhnykh vahoniv* [Scientific substantiation of the choice of geometrical parameters of heating zones during thermal adjustment of the elements of load bearing systems of freight cars]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya: naukovyy zhurnal* – Bulletin of Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University: Scientific Journal, Severodonetsk, Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University Publ., 2017, no. 4(234), pp. 227–232.

7. Fomin O.V., Logvinenko O.A., Burlutskiy O.V. *Protsedura pravky tekhnolohichno-deformovanykh vahonnykh metalokonstruktsiy shlyakhom stvorenniya vnutrishn'oho napruzhenoho stanu termichnym vplyvom* [The procedure of editing technologically-deformed wagon metal structures by creating an internal stressed state by thermal influence]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya: naukovyy zhurnal* – Bulletin of Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University: Scientific Journal, Severodonetsk, Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University Publ., 2017, no. 3(233), pp. 234–238.

8. Fomin O.V., Logvinenko O.A., Burlutskiy O.V., Fomina Yu.V. *Analiz isnyuyuchykh ta perspektyvnykh profiliv skladovykh elementiv nesuchykh system odynyts' rukhomoho skladu zaliznyts'* [Analysis of existing and perspective profiles of constituent elements of bearing systems of units of rolling stock of railways]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist' mashyn* – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Dynamics and Durability of Machines, Kharkiv, National Technical University «KhPI» Publ., 2016, Volume 1, no. 46, pp. 66–72. (DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2078-9130.2016.46.88052>).

9. Gerasimov V.S., Skiba I.F., Kernich B.M. *Tehnologija vagonostroenija i remonta vagonov* [Technology of car building and car repair]. – Moscow: Transport Publ., 1988. 381 p.

**Алексей Фомин, д.т.н., доцент**  
(профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный университет инфраструктуры и технологий)

**Алексей Бурлуцкий**  
(заведующий учебными лабораториями кафедры «Механика и проектирование машин», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

**Николай Горбунов, д.т.н., профессор**  
(профессор, заведующий кафедрой «Железнодорожный, автомобильный транспорт и подъемно-транспортные машины», Восточнокитайский национальный университет имени В. Даля)

**Александр Логвиненко, к.т.н., доцент**  
(доцент кафедры «Механика и проектирование машин», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

**Анна Фомина**  
(инженер филиала «ПВРЗ» ПАО «Укрзалізниця»)

#### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЯТЕН НАГРЕВА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРАВКЕ КАРКАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУВАГОНОВ**

*Выделена ведущая роль железнодорожного транспорта в осуществлении внутри- и внешнегосударственных экономических связей Украины. Отмечено, что в настоящее время актуальной и комплексной проблемой, которая стоит перед железнодорожным транспортом, является повышение надежности современного отечественного парка грузовых вагонов, среди которых основное место отводится полувагонам. Указано, что решение данной проблемы возможно за счет усовершенствования технологии производства их каркасных элементов.*



*Установлено, что наиболее экономически целесообразным методом стабилизации форм каркасных элементов полувагонов при их изготовлении является термическая правка. Показаны 3D модели балки хребтовой и обвязки верхней полувагона, которые были построены авторами в программном комплексе SolidWorks. Представлены математические планы исследований и соответствующие математические модели, которые позволяют выбирать оптимальные геометрические параметры пятен нагрева и температуру в зависимости от величины устраняемого прогиба. Приведены результаты моделирования процесса термической правки балки хребтовой и обвязки верхней, которое было проведено с использованием специализированного модуля Cosmos что входит в состав программного комплекса SolidWorks.*

*Ключевые слова:* железнодорожный транспорт, полувагон, сварочная операция, каркасные элементы, остаточные деформации, термическая правка, математическая модель, 3D моделирование.

*Oleksiy Fomin, Doctor of Science (Technical Sciences), Associate Professor (Professor of the Department «Cars and Carriage Economy», State University of Infrastructure and Technologies )*

*Oleksiy Burlutskyi*

*(Head of the Educational Laboratories at the Department of «Mechanics and Machine Design», Ukrainian State University of Railway Transport)*

*Mykola Horbunov, Doctor of Technical Sciences, Professor*

*(Professor, Head of the Department «Rail, Road Transport and Hoisting-and-Transport Machines», East Ukrainian National University named after V. Dal)*

*Oleksandr Logvinenko, PhD (Technical Sciences), Associate Professor*

*(Associate Professor of «Mechanics and Designing Machines», Ukrainian State University of Railway Transport)*

*Anna Fomina*

*(The Branch of Engineering «PVRZ» PAT «Ukrzaliznytsia»)*

#### **MATHEMATICAL MODELING OF VARIATIONAL CHARACTERISTICS OF HEIGHT STAINS AT THE THERMAL REMOVAL OF THE CARRIAGE ELEMENTS OF GONDOLA CARS**

*The leading role of railway transport in the implementation of domestic and foreign economic relations of Ukraine is highlighted. It is noted that at present the current and complex problem facing rail transport is the increase of the reliability of the modern domestic fleet of freight cars, among which the main place is given to open wagons. It is indicated that the solution of this problem is possible due to the improvement of the technology of production of their frame elements. It is established that the most economically*

*expedient method of stabilizing the forms of frame elements of open-top wagons when they are manufactured is thermal correction. 3D models of the spine and spool of the upper gondola car are shown, which were constructed by the authors in the SolidWorks software package. The mathematical research plans and the corresponding mathematical models are presented that allow choosing optimal geometric parameters of heating spots and temperature depending on the amount of deflection to be removed. The results of modelling the process of thermal straightening of the spine and top banding are presented, which was carried out using the specialized Cosmos module that is part of the SolidWorks software package.*

*Keywords: railway transport, gondola car, welding operation, frame elements, residual deformations, thermal correction, mathematical model, 3D modeling.*

**Стаття надійшла до редакції 30.10.2017 р.**