

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021.2

doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-62-70

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ РАМЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ВАГОНА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ШЛАКА

Дмитрий Яковлевич Антипин<sup>1✉</sup>, Денис Андреевич Бондаренко<sup>2</sup>, Марина Владимировна Мануева<sup>3</sup>, Дмитрий Юрьевич Расин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

<sup>2</sup> dilekter@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4638-0438>

<sup>3</sup> mari\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5785-8338>

<sup>4</sup> dmrr1979@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5360-4401>

### Аннотация

Предложена методика оценки прочности и усталостной долговечности сварной несущей конструкции рамы специализированного вагона для перевозки шлака. Методика предусматривает учет специфических режимов эксплуатации вагона, в значительной степени отличающихся от условий эксплуатации магистральных грузовых вагонов. Для рассматриваемого типа вагона определяющими усталостную долговечность являются режимы, связанные с выполнением погрузочно-разгрузочных работ, а также температурные нагрузки, действующие на несущую конструкцию рамы. Предлагаемая методика сформирована на основе математического и компьютерного моделирования динамической нагруженности вагона в эксплуатации. Динамические нагрузки определяются на основе разработан-

ной твердотельной модели вагона. Оценка прочности конструкции выполнена с использованием метода конечных элементов. Усталостная долговечность конструкции оценивается в рамках гибридной модели, включающей в себя элементы мало- и многоциклового усталости. Апробация методики проведена на примере специализированного вагона для перевозки шлака марки 16-ВП. Полученные результаты подтвердили работоспособность исследуемой конструкции вагона и хорошо коррелируются с результатами натурных испытаний и анализа несущих конструкций, находящихся в эксплуатации.

**Ключевые слова:** вагон, шлак, конструкция, нагрузка, напряженно-деформированное состояние, соединения, долговечность.

Ссылка для цитирования:

Антипин Д.Я. Методика анализа усталостной долговечности несущей рамы специализированного вагона для перевозки шлака / Д.Я. Антипин, Д.А. Бондаренко, М.В. Мануева, Д.Ю. Расин // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 2. – С.62-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-62-70.

Original article

Open Access Article

## TECHNIQUE TO ANALYSE FATIGUE LIFE OF THE BEARER FRAME OF A SPECIALIZED SLAG CARRIAGE

Dmitry Yakovlevich Antipin<sup>1✉</sup>, Denis Andreevich Bondarenko<sup>2</sup>, Marina Vladimirovna Manueva<sup>3</sup>, Dmitry Yuryevich Rasin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

<sup>2</sup> dilekter@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4638-0438>

<sup>3</sup> mari\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5785-8338>

<sup>4</sup> dmrr1979@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5360-4401>

### Abstract

A technique to assess the strength and fatigue life of the welded load-bearing frame structure of a

specialized slag carriage is proposed. This method provides for taking into account the specific operating

modes of the carriage, which differ significantly from the operating conditions of mainline freight cars. For this car type, the fatigue life is determined by the modes associated with loading and unloading operations, as well as temperature loads acting on the bearing structure of the frame. The proposed method is based on mathematical and computer modeling of the dynamic loading of a car in operation. Dynamic loads are found on the basis of the developed solid car model. The structural strength is assessed using the finite element method. The fatigue life of the structure is

estimated within the framework of a hybrid model that includes elements of low- and multi-cycle fatigue. The approbation of the technique is carried out using the example of a specialized car for transporting 16-BП slag. The results obtained confirm the operability of the studied car structure and correspond well with the results of field tests and analysis of bearing structures in operation.

**Keywords:** car, slag, construction, load, deflected mode, joints, durability.

*Reference for citing:*

*Antipin DYa, Bondarenko DA, Manueva MV, Rasin DYu. Technique to analyze fatigue life of the bearer frame of a specialized slag carriage. Transport Engineering. 2024;2:62-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-62-70.*

## Введение

Существующий в настоящий уровень развития отечественной металлургической промышленности, а также перспективы развития отрасли и программы перевооружения производства, выдвигает новые требования к созданию специализированного подвижного состава для выполнения технологических операций. Одной из таких операций является прием жидкого шлака из сталеплавильных агрегатов и его последующая транспортировка и выгрузка в отвал предприятия или грануляционную установку. Для реализации данной технологической операции используются специализированные транспортные агрегаты – вагоны-шлаковозы.

На данный момент металлургическими предприятиями эксплуатируются четырехосные шлаковозы с объемом чаш 11, 16 и 16,5 куб. м. Конструкции указанных вагонов схожи и включают в себя ходовые части, тормозное и автосцепное оборудования в значительной части унифицированное с магистральными отечественными грузовыми вагонами. Основным несущим элементом вагона является рама с изгибом в вертикальной плоскости на длине базы и установленными в шкворневых зонах лафетами и шлаковый ковш. На лафетах размещаются элементы механизма поворота ковша, на раме рельсовые захваты, обеспечивающие безопасность в отношении опрокидывания вагона при выполнении операции по разгрузке ковша. Конструктивно вагоны отличаются механизмами опрокидывания шлакового ковша. На предприятиях эксплуатируются шлаковозы с винтовой и безвинтовой схемой механизма опрокидывания шлакового ковша.

Оценка эксплуатационной надежности вагонов-шлаковозов позволила сделать вывод о том, что одним из характерных типов отказов является появление усталостных трещин в зонах сварных соединений рамы. Детальный анализ причин возникновения указанных повреждений в эксплуатации показал, что их причиной являются совокупность динамических нагрузок, действующих в эксплуатации, а также температурные нагрузки, значительно изменяющиеся в короткий период времени.

Исследование динамической нагруженности рамы в эксплуатации показало, что режимы нагружения в значительной степени отличаются от традиционных, применяемых при проектировании грузовых вагонов. Для грузовых вагонов, эксплуатируемых на магистральных путях железных дорог основными динамическими нагрузками, являются вертикальные, возникающие вследствие движения вагона по неровностям пути и продольные горизонтальные, действующие при выполнении маневровых работ и при движении в составе поезда.

Для вагона-шлаковоза основные динамические нагрузки связаны с процессом погрузки шлака в ковш, движением по железнодорожным путям промышленного предприятия и процесса выгрузки шлака путем опрокидывания чаши ковша. При этом на несущую конструкцию рамы вагона действует совокупность динамических усилий, величину которых достаточно сложно определить аналитическими мето-

дами. Кроме динамических усилий на несущую конструкцию действуют температурные нагрузки, связанные с высокой температурой перевозимого груза, а также значительные низкие температуры окружающей среды в зимний период. С учетом того, что многие предприятия, эксплуатирующие рассматриваемый подвижной состав, находятся в северных широтах с длительными периодами низких температур окружающей среды перепады температурных нагрузок, действующих на несущую конструкцию, оказываются достаточно

### Методика исследований

Учитывая описанную выше специфику сочетания динамических нагрузок, действующих на несущую конструкцию рамы вагона-шлаковоза в эксплуатации в качестве метода их определения, можно рассматривать натурные эксперименты и математическое моделирование [1]. Принимая во внимание, что вагоны разных конструкций будут обладать собственными наборами динамических усилий, значительно отличающихся друг от друга и необходимость прогнозирования их для вновь проектируемых конструкций в качестве инструмента для их определения целесообразно использование методов компьютерного математического моделирования с верификацией моделей данными натурных испытаний.

В связи с этим в основу предлагаемой методики положено использование математической компьютерной модели проектируемого или исследуемого вагона-шлаковоза [2]. Совокупность нагрузок, действующих на несущую конструкцию рамы лучше группировать по технологическим операциям, реализуемым вагоном:

- нагрузки, возникающие при загрузке вагона шлаком;
- транспортировке шлака до места разгрузки;
- разгрузке вагона, путем опрокидывания шлакового ковша;
- возвращении ковша в исходное положение и движении порожнего вагона к месту погрузки.

В процессе первой операции динамические нагрузки воздействуют на опоры

значительными. Что в совокупности с описанными специфическими действующими динамическими нагрузками приводит к возникновению усталостных повреждений несущих конструкций рам вагонов-шлаковозов в эксплуатации. В связи с этим актуальной становится задача создания специализированной методики оценки усталостной долговечности несущих конструкций рам специализированных вагонов для перевозки шлака, учитывающей особенности их нагруженности в эксплуатации.

шлакового котла вследствие падения в него груза. Также в процессе погрузки на раму действуют температурные нагрузки, вызванные высокой температурой груза 1400...1550 °С и температуры в промышленном помещении в зоне выполнения погрузочных работ до 45 °С.

При транспортировке груза до места выгрузки на раму действуют вертикальные динамические нагрузки в зоне опирания кузова на тележки, в зоне опирания шлакового ковша на лафеты рамы. Движение осуществляется со скоростью до 15 км/ч. Величина нагрузок определяется, в значительной степени состоянием рельсовой колеи. Продольные горизонтальные нагрузки, действуют в зонах передних и задних упоров автосцепного оборудования, возникающие вследствие взаимодействия вагонов в составе сцепы при движении. Также на несущую конструкцию действуют температурные нагрузки, обусловленные температурой окружающей среды, с учетом климатического исполнения вагона они могут достигать уровня – минус 50 °С.

При разгрузке вагона осуществляется поворот ковша на угол до 118°. При этом на раму воздействует сложное сочетание вертикальных и горизонтальных поперечных нагрузок. Они действуют в зоне опор шлакового ковша, в зонах опирания рамы на тележки, в области крепления привода поворота, а также в местах крепления рельсовых захватов. С учетом высокой температуры разгружаемого груза на несущую конструкцию рамы осуществляется

интенсивное тепловое воздействие на фоне низкой температуры окружающей среды.

При возвращении ковша в исходное положение и движении в порожнем режиме к месту погрузки на несущую конструкцию рамы воздействуют нагрузки аналогичные предыдущим двум описанным технологическим операциям, с учетом изменения массы ковша.

В рамках предлагаемой методики на первом этапе осуществляется разработка детализированных пространственных моделей основных элементов конструкции вагона-шлаковоза.

На втором этапе на основе разработанных трехмерных моделей формируется пространственная динамическая модели вагона, представляющая собой совокупность абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирами, силовыми и контактными элементами. По результатам математического моделирования описанных выше технологических операций формируются графики изменения усилий, действующих на несущую конструкцию рамы во времени.

На третьем этапе из пространственной модели несущей конструкции рамы формируется ее поверхностная модель и на ее основе с использованием автоматических генераторов сеток создаётся пластинчатая конечно-элементная модель. В соответствующие узлы модели вводятся связи, обеспечивающие закрепление рамы в пространстве по шести степеням свободы и динамические усилия, полученные из динамической модели вагона на предыдущем этапе методики. Сочетания нагрузок принимается в соответствии с анализируемой технологической операцией. Расчет изменения напряжений в

узлах несущей конструкции рамы во времени производится с использованием метода непосредственного интегрирования уравнений узловых перемещений.

Дополнительно к динамическим нагрузкам, действующим на несущую конструкцию, добавляются тепловые, связанные с излучением теплового потока грузом и изменением температуры окружающей среды. И далее решается нестационарная термоупругопластическая задача [3]. В итоге решения пространственной задачи нагрева несущей конструкции рамы при выполнении технологических операций формируются данные о поперечных, продольных и касательных напряжениях, возникающих в процессе действия температурных полей. Далее на основе анализа полученных данных о динамической и тепловой нагруженности несущей конструкции рамы определяются наиболее нагруженные сварные соединения.

Определение значения коэффициента концентрации напряжений в зоне сварного соединения осуществляется с помощью уточненных аппроксимирующих зависимостей, полученных экспериментальными, а также численными методами решения задач теории упругости, в частности методами Колосова-Мусхелишвили, конформного отображения [4-6],

Анализ усталостной долговечности несущей конструкции выполняется на основе детерминированной методики С.В. Серенсена-В.П. Когаева [7] со схематизацией действующих на конструкцию динамических напряжений методом полных циклов.

Ресурс сварного соединения в циклах нагружения  $N_c$  определяется зависимостями

$$N_c = \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[\sigma_y]} \right)^m \times N_0}{\sum_{i=1}^{k_v} (\sigma_{ai}^B)^m P_{vi} + k_{\Pi}^p \left[ \sum_{i=1}^{k_{r,p}} (\sigma_{ai}^{r,p})^{m_c} P_i^{r,p} \right] + k_{\Pi}^{сж} \left[ \sum_{i=1}^{k_{r,сж}} (\sigma_{ai}^{r,сж})^{m_c} P_i^{r,сж} \right]} \quad (1)$$

и во времени

$$T_k = \frac{N_c}{B \cdot f_s}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{a,N}$  – величина предела выносливости натурной детали вагона (по амплитуде), вычисленная для симметричного цикла

при базовом числе циклов испытаний;  $N_0$  – базовое число циклов испытаний;  $[\sigma_y]$  – допускаемое значение коэффициента запа-

са сопротивления усталости;  $\sigma_{ai}$  – уровень амплитуды напряжений при движении вагона в  $i$ -том скоростном интервале;  $P_{vi}$  – вероятность движения вагона в  $i$ -том интервале скоростей, принимается в соответствии с рекомендациями Норм [8];  $k_v$  – количество интервалов скоростей движения вагона;  $\sigma_{ai}^{г.р.}$ ,  $\sigma_{ai}^{г.сж.}$  – величины напряжений при действии на вагон продольных растягивающих и сжимающих усилий  $i$ -го уровня;  $P_i^{г.р.}$ ,  $P_i^{г.сж.}$  – вероятности действия на вагон продольных растягивающих и сжимающих усилий  $i$ -го уровня соответственно;  $k_{г.р.}$ ,  $k_{г.сж.}$  – количество уровней продольных растягивающих и сжимающих сил, действующих на вагон соответственно;  $m$  – показатель степени уравнения кривой усталости в амплитудах;  $m_c$  – показатель степени уравнения кривой усталости модели малоциклового усталости;  $k_{п}^p$ ,  $k_{п}^{сж.}$  – коэффициенты приведения, учитывающие соотношение между количеством циклов вертикальных усилий, возникающих при движении вагона за один год  $N_B^г$ , и количеством продольных растягивающих и сжимающих усилий, действующих на вагон в течение года  $N_{г.р.}^г$  и  $N_{г.сж.}^г$  соответственно.

### Оценка усталостной долговечности рамы вагона-шлаковоза

В качестве объекта для апробации методик рассмотрена конструкция вагона для перевозки шлака марки 16-ВП с объемом чаши 16 куб. м.

В среде промышленного программного комплекса «Универсальный меха-

Вероятность безотказной работы сварного шва в течение срока службы при циклическом нагружении конструкций  $P(T_k)$  может быть определена с учетом гипотезы о нормальном распределении вероятностного рассеивания характеристик сопротивления усталости шва по зависимости

$$P(T_k) = 0,5 + \Phi \left( \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 \gamma_{\sigma_{a,N}}^2 + \gamma_{\varepsilon}^2}} \right), \quad (3)$$

где  $\tilde{n}$  – относительный коэффициент запаса;  $\gamma_{\varepsilon}$  – коэффициент вариации амплитуд динамических эксплуатационных напряжений;

$$\tilde{n} = \frac{n_{п}}{n_{пс}}, \quad (4)$$

$n_{п}$  – предельный коэффициент нагруженности, соответствующий величине  $N_c / N_0$ ;  $n_{пс}$  – предельный коэффициент нагруженности по средним значениям параметров усталостной долговечности;

$$n_{пс} = \frac{\sigma_{a,\varepsilon} (1 + u_{P,\max} \gamma_{\sigma_{a,\varepsilon}})}{\sigma_{a,N}}, \quad (5)$$

$u_{P,\max}$  – максимальный расчетный квантиль для нормального закона распределения.

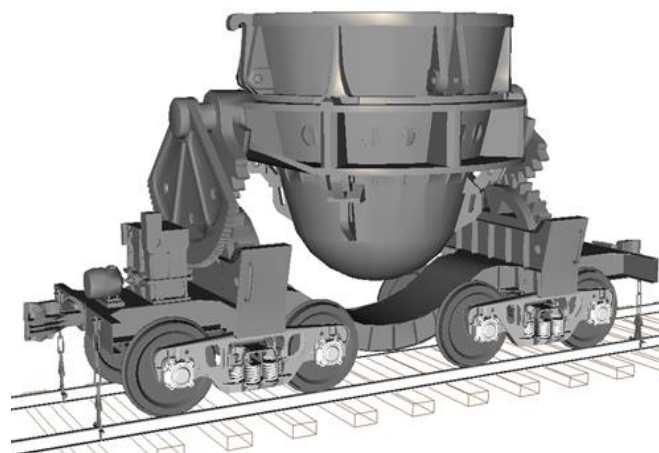


Рис. 1. Компьютерная динамическая модель вагона для перевозки шлака  
Fig. 1. Computer dynamic model of a slag carriage

По результатам моделирования были получены данные о динамической нагруженности несущей конструкции рамы при выполнении технологических операций.

На следующем этапе проведена оценка параметров прочности несущей конструкции рамы вагона на основе использования метода конечных элементов.

Конечно-элементная расчетная схема (рис. 2) разработана на основе созданной

пространственной твердотельной модели рамы. Из нее получена поверхностная модель, из которой с помощью автоматического генератора сеток конечно-элементная. Модель формировалась трех- и четырехузловыми пластинчатыми конечными элементами: количество узлов - 173800; количество элементов - 115000; размер элемента - 30 мм.

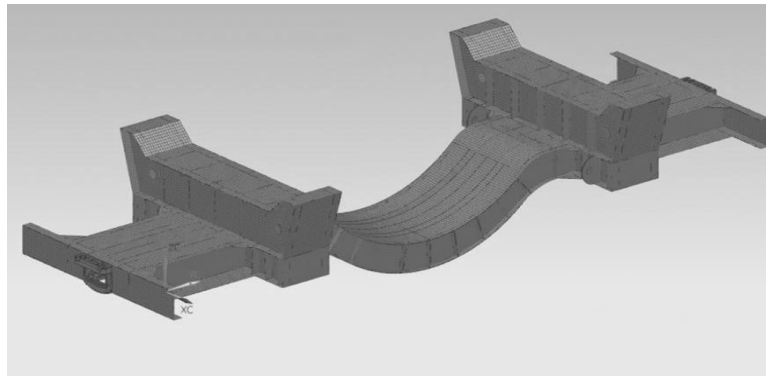


Рис.2. Конечно-элементная модель рамы вагона  
Fig.2. Finite element model of the carriage frame

Полученная конечно-элементная модель закреплена в пространстве как абсолютно твердое тело путем введения связей в пятниковые узлы. К соответствующим узлам модели приложены динамические нагрузки, полученные в результате моделирования

выполнения технологических операций на предыдущем этапе, включая тепловые.

Результаты оценки прочности несущей конструкции рамы для режима движения вагона в составе поезда и режима погрузки приведены на рис. 3 и 4.

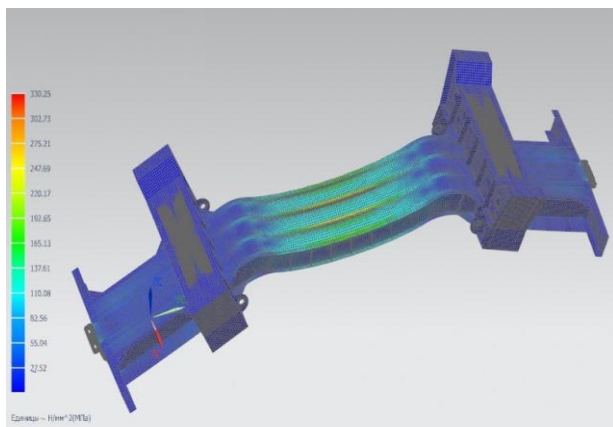


Рис. 3. Результаты расчета рамы вагона для режима разгрузки вагона  
Fig. 3. The results of the calculation of the wagon frame for the unloading mode of the wagon

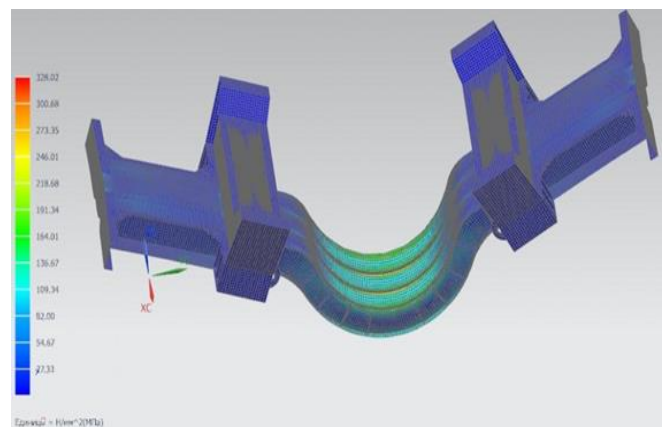


Рис. 4. Результаты расчета рамы вагона для режима погрузки вагона  
Fig. 4. The results of the calculation of the wagon frame for the loading mode of the wagon

Полученные максимальные напряжения, возникающие в несущей конструкции  $\sigma_{max}$ , приведены в таблице,

как для варианта расчета с учетом тепловых нагрузок, так и без них. В результате проведенного расчета

выявлено, что наибольшие напряжения действуют в средней части продольной балки рамы. Оценка прочностных расчетов показала, что наиболее нагруженными являются режимы

погрузки и выгрузки, при этом напряжения, возникающие при выгрузке больше напряжений при погрузке на 10,7 %.

Таблица  
Максимальные напряжения, возникающие в несущей конструкции рамы вагона  
*Table*  
*Maximum stresses arising in the supporting structure and permissible stresses*

Режимы работы	$\sigma_{\max}$ , МПа
Режим погрузки вагона (без учета температурных нагрузок)	216
Режим погрузки вагона (с учетом температурных нагрузок)	251
Режим разгрузки вагона (без учета температурных нагрузок)	242
Режим разгрузки вагона (с учетом температурных нагрузок)	284

Расчет проводился для двух вариантов сочетаний нагрузок. Сопоставление полученных результатов указывает на то, что учет температурных нагрузок привел к росту максимального напряжения для режима загрузки на 13,9 %, а для режима разгрузки на 14,8 %.

Расчет параметров усталостной долговечности наиболее нагруженных сварных соединений показал, что минимальная долговечность сварных соединений составляет 15,7 года для сварных соединений продольной балки рамы в ее среднем сечении.

### Заключение

Анализ результатов, приведенных в таблице показал, что прочность несущей конструкции рамы обеспечена, при этом целесообразно учитывать температурные нагрузки, действующие на несущую конструкцию. Оценка усталостной долговечности прочности и надежности рамы с использованием предлагаемой методики показывает, что полученные результаты хо-

рошо коррелируются с результатами натуральных испытаний и обследований несущих конструкций рам вагонов, находящихся в эксплуатации. В целом полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения предлагаемой методики для анализа прочности и надежности несущих конструкций вагонов промышленного транспорта.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шалупина, П.И. Использование промышленных программных комплексов для исследования динамической нагруженности конструкций рельсового транспорта / П.И. Шалупина, Д.Я. Антипин//Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2015. С.
2. Loza, A., Chigarev, V., Shishkin, V., Rassokhin, D. (2016). Application of welded elements with the objective of reducing deformation of slag car casing. Наукові нотатки. 93-96.
3. Yuan, Mingxin & Liu, Suodong & Sun, Hongwei & Gao, Yunqiang & Dai, Xianling & Chen,

- Weibin. (2021). FEM Research on Welding Thermal Deformation of Copper Alloy Sheet and Optimization of Welding Sequence. Coatings. 11. 1287.
4. Кархин, В.А. Концентрация напряжений в стыковых соединениях/ В.А. Кархин, Л.А. Копельман// Сварочное пр-во. 1976. №2. С. 6-7.
5. Турмов, Г.П. Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях/ Г.П. Турмов // Автомат. сварка. 1976. №10. С.
6. Березовский, Б.М. Коэффициент концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях/ Б.М. Березовский, О.А. Бакши: тр. Челябин. политехн. ин-та // Вопр. свароч. пр-ва. 1981. №266. С. 3-10.

7. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени/ В.П. Когаев; под ред. А.П. Гусенкова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм. (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.

9. Антипин, Д. Я. Оценка безопасности эксплуатации вагона для перевозки шлака / Д. Я. Антипин, Н. Ю. Тысева // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 6-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 21–22 апреля 2016 года / Ответственный редактор Горохов А.А. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 20-22.

## REFERENCES

1. Shalupina PI, Antipin DYa. The use of industrial software systems for the study of dynamic loading of rail transport structures. Collection of Scientific Papers of the 5th International Scientific and Practical Conference, 2015: Innovation, Quality and Service in Technology; Kursk: Universitetskaya Kniga; 2015.
2. Loza A, Chigarev V, Shishkin V, Rassokhin, D. Application of welded elements with the objective of reducing deformation of slag car casing. Наукові Нотатки; 2016.
3. Yuan, Mingxin & Liu, Suodong & Sun, Hongwei & Gao, Yunqiang & Dai, Xianling & Chen, Weibin. FEM research on welding thermal deformation of copper alloy sheet and optimization of welding sequence. Coatings. 2021;11:1287.
4. Karkhin VA, Kopelman LA. Stress concentration in steel joints. Svarochnoe Proizvodstvo. 1976;2:6-7.
5. Turmov GP. Determination of the stress concentration coefficient in welded joints. Avtomaticheskaya Svarka. 1976;10:14-17.
6. Berezovsky BM. Stress concentration coefficient in butt-welded jointsю Voprosi Svarochnogo Proizvodstva. 1981;266:3-10.
7. Kogaev VP. Calculations for strength under stresses varying in time. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Mashinostroenie; 1993.
8. Standards for calculating and designing railcars of 1520 mm MPC gauge (non-self-propelled). Moscow: GosNIIV – VNIIZHT; 1996.
9. Antipin DYa, Tyseva NYu. Safety assessment of the slag carriage operation. Collection of scientific papers of the 6th International Scientific and Practical Conference, April 21-22, 2016: Modern Innovations in Science and Technology; Kursk: Universitetskaya Kniga; 2016.

## Информация об авторах:

**Антипин Дмитрий Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор Учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)56-04-66.

**Бондаренко Денис Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)56-04-66.

**Antipin Dmitry Yakovlevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)56-04-66.

**Bondarenko Denis Andreevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)56-04-66.

**Мануева Марина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)56-04-66.

**Расин Дмитрий Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)56-04-66.

**Manueva Marina Vladimirovna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)56-04-66.

**Rasin Dmitry Yuryevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)56-04-66.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**



**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 23.01.2024; принята к публикации 26.01.2024. Рецензент – Самошкин С.Л., доктор технических наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития Акционерного общества Научная организация «Тверской институт вагоностроения».**

**The article was submitted to the editorial office on 12.01.2024; approved after review on 23.01.2024; accepted for publication on 26.01.2024. The reviewer is Samoshkin S.L., Doctor of Technical Sciences, Head of Scientific and Technical Support and Development Department of Joint Stock Company Scientific Organization «Tver Institute of Carriage Building».**