

УДК 629.4.023.14

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-29-37

В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, Д.Ю. Расин, М.В. Мануева

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложена методика анализа прочности и надежности несущих конструкций подвижного состава, основанная на динамической оценке нагруженности несущих конструкций подвижного состава в эксплуатации методами математического моделирования. Оценка ресурса конструкции в разработанной методике производится в рамках моделей мало- и многоциклового усталости. Методика апробирована на примере совершенствования кон-

струкции шкворневого узла универсального полувагона. По результатам исследования предложены конструктивные меры, обеспечивающие повышение прочности и надежности исследуемой конструкции.

**Ключевые слова:** прочность, надежность, усталостная долговечность, математическое моделирование, подвижной состав железных дорог, универсальный полувагон.

V. V. Kobishchanov, D. Ya. Antipin, D. Yu. Rasin, M. V. Manueva

## METHODS DEVELOPMENT OF STRENGTH AND RELIABILITY ANALYSIS OF ROLLING-STOCK BEARING STRUCTURE USING MATHEMATICAL MODELING METHODS

The purpose of the work is a procedure formation for the analysis of strength and reliability of rolling-stock bearing structure using methods of mathematical modeling. Its appraisal is shown by the example of improvements in a universal gondola car bearing structure. The procedure offered is formed by a mathematical modeling of bearing structure dynamic loading in the rolling-stock operation including shunting movement encounters. At the first stage of the procedure the dynamic computer simulations of a rail crew movement on way roughness are under development. As a result of modeling there are defined dynamic loads influencing a bearing structure in operation. The analysis of the stress-strain state of the bearing structure is carried out on the basis of detailed shell finite element models. The computation is carried out in a dynamic position through the method of the direct integration of nodal-relocation equations. The estimate of bearing structures fatigue life in a pivot area was carried out on the basis of the linear hypothesis of fatigue damages summation, the power approximation of a material fatigue curve and scheming dynamic stresses affecting the structure through the method of complete cycles.

Within the limits of the procedure the history of loading was presented as a step function. On the basis of the results of a stress-strain state in the bearing structure of a gondola car body in a static and dynamic location there is carried out the analysis of fatigue life in a pivot area of the gondola car and the conclusions were drawn regarding crack-like defect occurrence in a center plate arrangement of a frame.

There are offered three versions for updating the pivot joint of a gondola car with the purpose of its fatigue life increase. For each version of updating there are developed corresponding detailed finite element models of the pivot area and on their basis the analysis of strength and fatigue life is performed.

On the basis of computation results and taking into account the manufacturability of center plate arrangement production an efficient version is recommended for updating a pivot joint of a gondola car. The pivot joint modernization according to the version offered allowed decreasing maximum acting stresses in the pivot joint by 27% and increasing service life of the welded joint elements up to 29 years.

**Key words:** strength, reliability, fatigue life, mathematical modeling, railway rolling-stock, universal gondola car.

### Введение

В настоящий момент явными трендами развития методов проектирования подвижного состава железных дорог, и грузовых вагонов в частности, является сокращение сроков проектирования, по-

требность в разработке значительного количества новых конструкций, ориентированных на запросы потребителей. При этом важным фактором является не только сокращение сроков проектирования, но и

снижение затрат на изготовление и сертификацию вагоностроительной продукции. Одним из действенных способов достижения подобных результатов является совершенствование методов анализа прочности и надежности конструкций на стадии проектирования [1]. Основным направлением совершенствования современных методов проектирования подвижного состава является расширение применения методов компьютерного трехмерного проектирования и математического моделирования процессов их жизненного цикла. Применение компьютерного проектирования с использованием цифровой копии единицы подвижного состава позволяет значительно сократить затраты ресурсов на разработку проблемно-ориентированных моделей.

При этом ядром проектирования является детализированная трехмерная модель единицы подвижного состава [2]. На ее основе создаются проблемно-ориентированные динамические, конечноэлементные и другие модели. Корректное применение моделей позволяет повысить точность получаемых результатов и расширить спектр внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на процесс эксплуатации подвижного состава. В

### Метод исследования

В рамках указанных тенденций предложена методика анализа ресурса вагонных конструкций на основе математического моделирования эксплуатационной нагруженности, моделей мало- и многоциклового усталости [4]. На первом этапе осуществляется оценка динамического напряженного состояния конструкций вагонов. Для этого разрабатывается динамическая модель подвижного состава, в которой ходовые части, автосцепное, тормозное, силовое оборудование включаются в модель в качестве подсистем. Подсистемы представляют собой абсолютно твердые тела, взаимодействующие между собой посредством шарниров, силовых и контактных элементов [5]. При оценке динамической нагруженности рассматривается движение вагонов по реальным неровностям пути на прямолинейных и криволи-

нейных участках, стрелочных переводах, а также служебное торможение и маневровые соударения. В результате расчета динамической модели определяются динамические усилия, действующие на исследуемую несущую конструкцию.

На втором этапе на основании пространственной геометрической модели несущих элементов конструкции подвижного состава разрабатывается детализированная конечноэлементная модель, состоящая из оболочечных и объемных элементов. Далее выполняется расчет действия нагрузок, полученных в результате моделирования движения вагона, на конструкцию [6]. Для уточнения напряженного состояния наиболее нагруженных участков с использованием методики поэтапного выделения разрабатываются их конечноэлементные модели с более высокой степенью детализации.

зации, вплоть до моделирования геометрии сварных швов. На границе выделенной зоны из конечноэлементной модели конструкции определяются действующие силовые факторы, которые в дальнейшем используются в качестве граничных условий для модели выделенной зоны. Оценка усталостной долговечности проводится на основании методики С.В. Серенсена – В.П. Когаева с учетом малоциклового нагружения, остаточных сварочных напряжений и поверхностной упрочняющей обработки, а также уточненного расчета коэффициентов концентрации напряжений в зонах сварных соединений.

Применение описанной методики рассмотрим на примере решения задачи по

совершенствованию несущей конструкции кузова универсального полувагона [7].

На первом этапе исследования оценка динамической нагруженности несущей конструкции кузова полувагона в эксплуатации выполнена методами твердотельного компьютерного моделирования. В качестве инструмента исследования используется программный комплекс «Универсальный механизм» [5]. Рассматривалось движение порожнего и груженого полувагона в сцепе с аналогами по прямолинейным участкам пути, в кривых радиусами 350... 1200 м, а также прохождение стрелочного перевода Р65 марки 1/11. Дополнительно рассматривались маневровые соударения вагона с подпором массой 300 т со скоростью до 14 км/ч.

### Исследование динамической нагруженности кузова полувагона

Динамическая модель полувагона (рис. 1) сформирована из кузова в виде абсолютно твердого тела, взаимодействующего через контактные элементы и враща-

тельные шарниры с подсистемами «тележка», и специальными шарнирами с подсистемой «автосцепное оборудование».

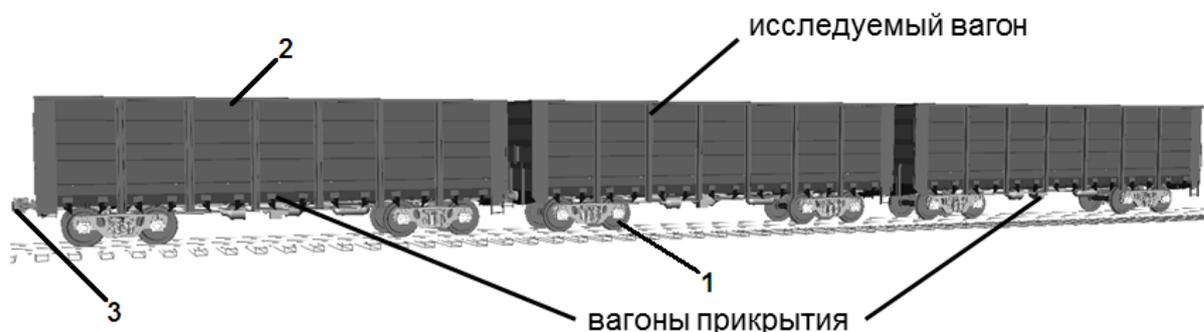


Рис. 1. Динамическая модель сцепа полувагонов: 1 – подсистема «тележка»; 2 – кузов; 3 – подсистема «автосцепное оборудование»

При анализе динамических характеристик вагона рассматривались варианты порожнего и груженого кузова вагона. Груз в модели представлен абсолютно твердым параллелепипедом, расположенным на полу вагона. Связь груза с кузовом моделировалась с использованием обобщенного шарнира, исключающего перемещение груза относительно кузова в любом направлении.

Анализ динамической нагруженности полувагона при маневровых работах производится на основе динамических моделей соударения вагона-бойка в исследу-

емый вагон с подпором 300 т и в свободно стоящий вагон. В результате моделирования были получены спектры динамических нагрузок, возникающих вследствие взаимодействия несущей конструкции кузова с элементами ходовых частей и автосцепного оборудования.

На рис. 2 в качестве примера приведены осциллограммы динамических усилий, действующих в зоне установки задних упоров автосцепного устройства при маневровых соударениях вагона с подпором, и свободно стоящим вагоном со скоростью 11 км/ч.

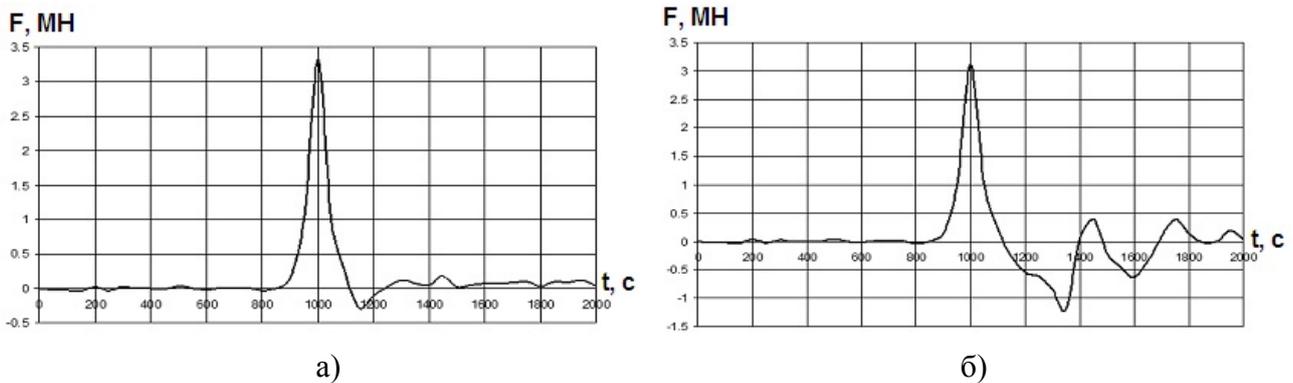


Рис. 2. Динамические усилия, на кузов при маневровых соударениях полувагона со скоростью 11 км/ч:  
а – полувагона с подпором; б – со свободно стоящим полувагоном

Адекватность полученных при моделировании результатов подтверждена их удовлетворительным соответствием дан-

ным натурных ходовых испытаний и испытаний на соударения, проведенных при сертификации вагона.

### Оценка прочности несущей конструкции шкворневой зоны кузова полувагона

Напряженно-деформированное состояние несущей конструкции кузова полувагона оценивалось на основе конечно-элементной модели, представляющей со-

бой пространственную расчетную систему, образованную трех- и четырехузловыми оболочечными элементами (рис. 3).

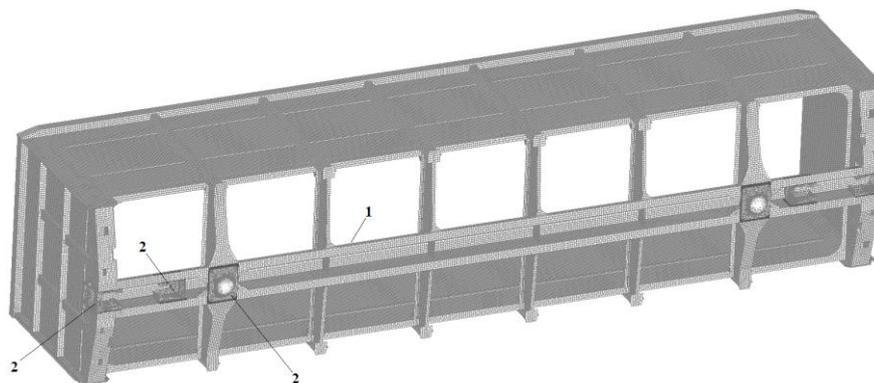


Рис. 3. Пластинчатая конечно-элементная модель кузова полувагона:  
1 – оболочечные элементы; 2 – пространственные объемные элементы

Моделирование литых конструкций кузова полувагона (передний упор, объединенный с розеткой автосцепки, задний упор и пятник) осуществлялось пространственными объемными элементами [7]. Совокупное количество элементов модели составило 227 тыс. Число узлов модели – 189 тыс., число степеней свободы составило 1 млн. 134 тыс.

Для уточнения напряженно-деформированного состояния в зоне шкворневого узла вагона из пластинчатой конечно-элементной модели кузова вагона был выделен фрагмент рамы, включающий в себя пятниковый узел, для которого разработа-

на детализированная упруго-диссипативная конечноэлементная модель, сформированная из 131 тыс. четырех-, шести- и восьмиузловых объемных элементов, объединенных в 53 тыс. узлов. Степень детализации конечноэлементной расчетной схемы позволила моделировать геометрию сварных швов (рис. 4). Достоверность результатов, получаемых с использованием разработанных конечноэлементных моделей, подтверждена их удовлетворительным соответствием данным натурных стендовых испытаний, а также испытаний на соударения.

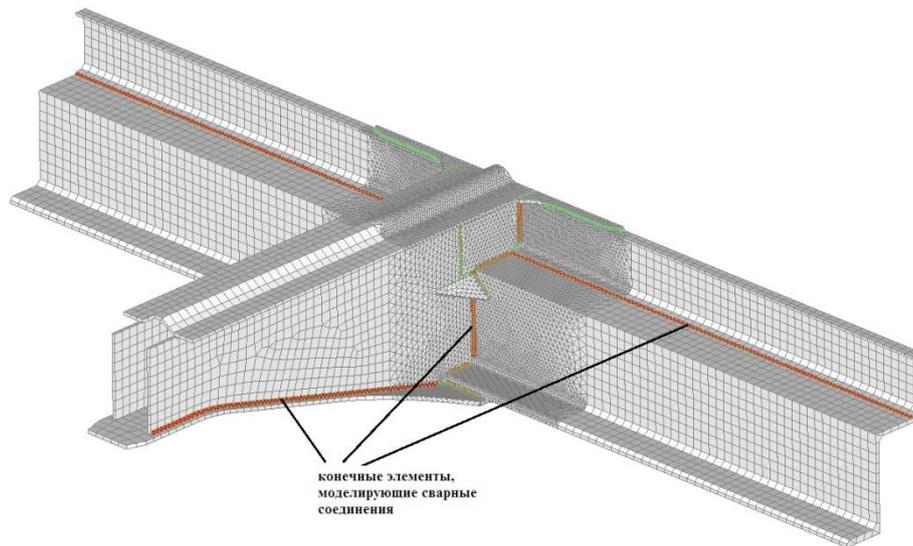


Рис. 4. Конечноэлементная модель шкворневой зоны рамы полувагона

К узлам конечноэлементной расчетной схемы кузова полувагона прикладывались динамические нагрузки, полученные из твердотельной модели сцепа вагонов.

Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции производился в динамической постановке методом непосредственного интегрирования уравнений узловых перемещений.

К узлам расчетной схемы, расположенным на границе выделенной области, прикладывались динамические нагрузки,

полученные из пластинчатой конечноэлементной модели кузова в целом.

В результате анализа несущей конструкции кузова вагона в целом и шкворневой зоны в динамической постановке были получены осциллограммы изменения напряжений во времени для всех рассмотренных режимов эксплуатации полувагона. В качестве примера на рис. 5 представлены осциллограммы изменения напряжений в шкворневой зоне при соударении вагона-бойка с исследуемым вагоном со скоростью 12 км/ч.

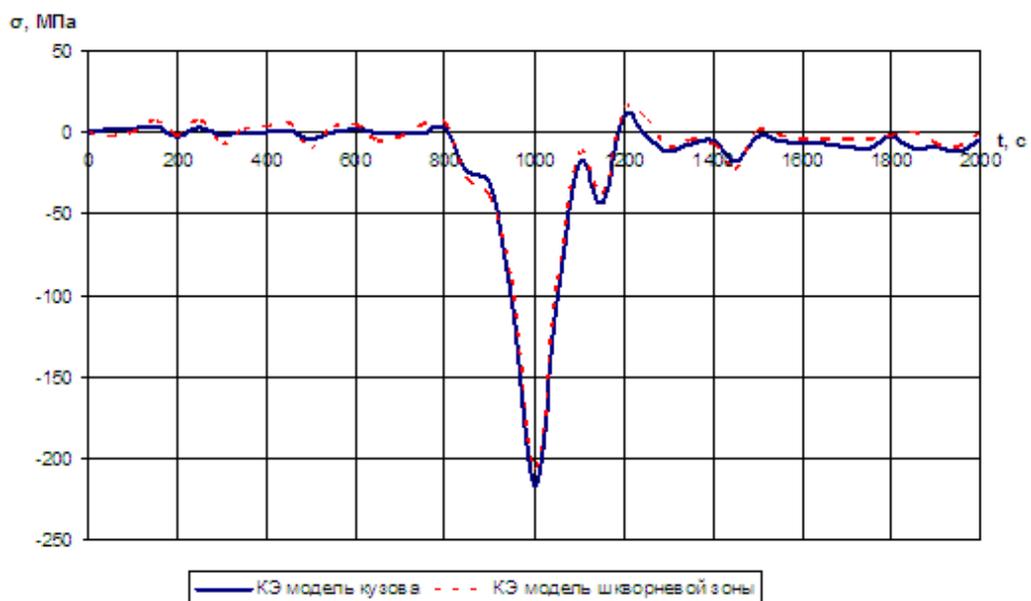


Рис. 5. Осциллограммы изменения напряжений в шкворневой зоне рамы полувагона при маневровом соударении вагонов со скоростью 12 км/ч

### Исследование усталостной долговечности шкворневого узла полувагона

Оценка усталостной долговечности несущих конструкций шкворневой зоны выполнялась на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, степенной аппроксимации кривой усталости материалов и схематизации действующих на конструкцию динамических напряжений методом полных циклов [8, 9]. В рамках методики история нагружения представлялась в виде ступенчатой функции.

При анализе усталостной долговечности принята следующая модель эксплуатации полувагона:

- 75 % времени движения полувагон находится в нагруженном до реализации грузоподъемности состоянии, 25 % – в порожнем (коэффициент порожнего пробега для полувагона – 0,25);

- 70 % времени полувагон следует по прямолинейным участкам пути, 25% – криволинейным, 5 % проходит стрелочные переводы;

- количество циклов нагружений полувагона через автосцепку за 1 год эксплуатации составляет 20200 циклов.

Полученный в результате расчетов срок службы элементов шкворневого узла составил от 4,2 до 8,6 лет, что согласуется со сроками эксплуатации полувагонов до обнаружения трещиноподобных повреждений.

Детальный анализ динамического напряженно-деформированного состояния несущей конструкции шкворневого узла показал, что низкий уровень усталостной долговечности шкворневого узла вагона объясняется сочетанием в нем нескольких негативных факторов: изгибных волнообразных деформаций стенок зетовых профилей хребтовой балки зоны надпятника вследствие ее недостаточной изгибной жесткости, а также высокого уровня концентрации напряжений, вызванного сосредоточением пересекающихся сварных швов [10].

### Совершенствование конструкции шкворневого узла рамы полувагона

Для устранения приведенных негативных факторов предложен вариант доработки узла, направленный на:

- исключение искривления силовых потоков, воспринимаемых и передаваемых шкворневой балкой, обусловленных расположением в разных плоскостях ребер шкворневых балок и поперечных диафрагм надпятников;

- исключение или существенное уменьшение изгибных волнообразных деформаций стенок зетовых профилей хребтовой балки, являющихся следствием горизонтального изгиба шкворневых балок при действии на вагон продольных нагрузок;

- исключение пересекающихся сварных швов в верхних углах профилей хребтовой балки (зоны соединений ребер шкворневых балок и соединительных планок с профилями хребтовой балки);

- исключение или уменьшение доли сварных швов, располагаемых в одном поперечном сечении хребтовой балки.

При разработке конструктивных решений также была поставлена задача – минимизировать объемы вносимых в конструкцию изменений и трудоемкости изготовления узла.

С учетом изложенных выше требований предложены три варианта модернизации шкворневого узла. Первый вариант (рис. 6, а) предусматривает совмещение поперечных диафрагм надпятника с ребрами шкворневых балок, установку усиливающих накладок на внутренние плоскости зетовых профилей хребтовой балки, изменение формы ребер шкворневых балок, а также изменение формы и толщины усиливающей планки.

Второй вариант (рис. 6, б) предусматривает совмещение поперечных диафрагм надпятника с ребрами шкворневых балок, установку усиливающих накладок на наружной плоскости зетовых профилей хребтовой балки, замену формы и толщины усиливающей планки. Третий вариант (рис. 6, в) предусматривает изменение формы вертикальных ребер шкворневой

балки, установку дополнительных диафрагм внутри шкворневых балок, изменение формы и толщины усиливающей планки, установку дополнительных косынок в узлах соединения ребер шкворневых балок со стенками зетовых профилей хребтовой балки.

Для каждого из вариантов модернизации разработаны соответствующие детализированные конечноэлементные модели шкворневой зоны (рис. 6), на основе которых проведен анализ прочности и усталостной долговечности.

Анализ результатов оценки усталостной долговечности предложенных вариантов несущей конструкции шкворневого узла показал, что:

- сроки службы для всех контрольных точек хребтовой и шкворневой балок конструктивных исполнений 1 и 2 выше назначенного срока службы полувагона;
- сроки службы для контрольных точек хребтовой и шкворневой балок конструктивного исполнения 3 ниже назначенного срока службы полувагона.

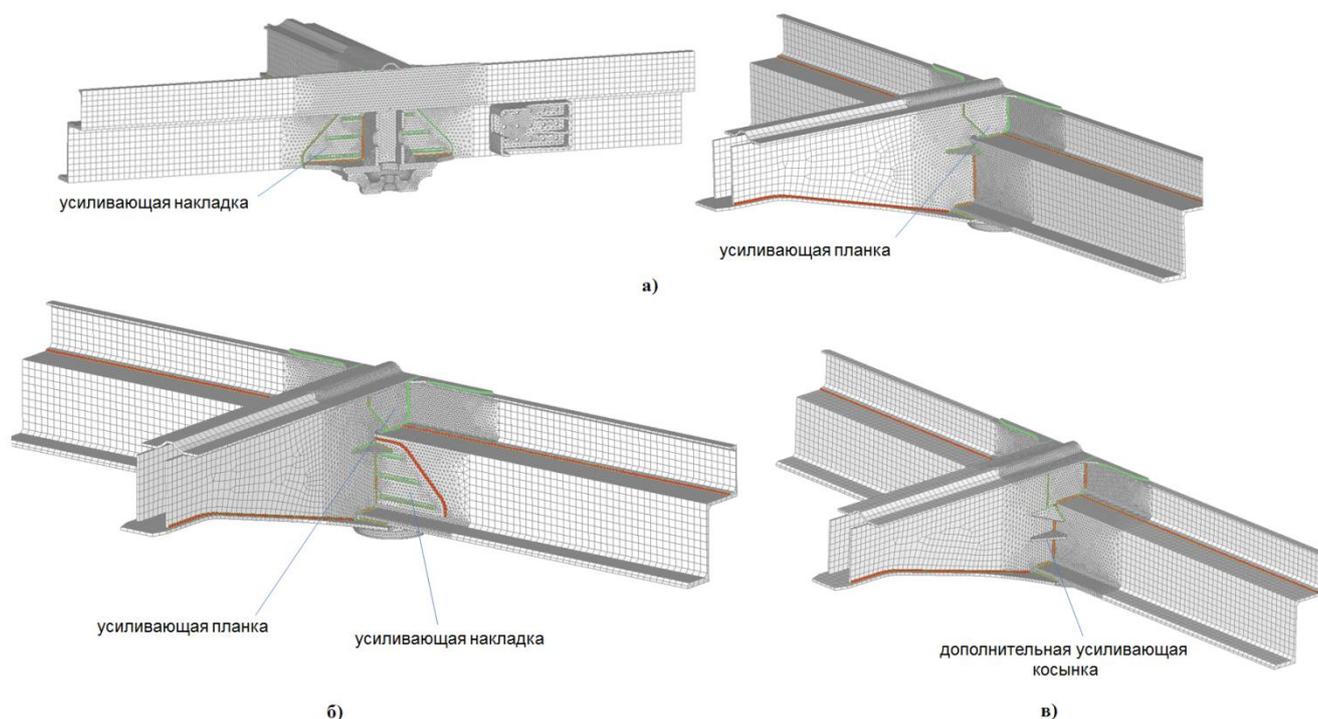


Рис. 6. Детализированные конечноэлементные модели модернизированных конструктивных исполнений шкворневого узла: а) – вариант 1; б) – вариант 2; в) – вариант 3

## Заключение

Полученные результаты указывают на целесообразность модернизации шкворневой зоны полувагона в рамках конструктивных исполнений 1 и 2.

Варианты модернизации конструкции шкворневого узла по исполнениям 1 и 2 по силовому взаимодействию, схеме деформаций и долговечности практически равноценны. Однако модернизация по исполнению 2 более технологична, поскольку не требует предварительной сборки

профилей хребтовой балки с усиливающими накладками, установка и приварка усиливающих накладок могут быть выполнены на этапе сварки хребтовой балки в поворотном приспособлении или без него. Также не требуется изменение размера по ширине поперечных диафрагм надпятников, и не ухудшаются условия соединения их с профилями хребтовой балки. В связи с этим в качестве базового был при-

нят второй вариант конструктивного исполнения шкворневого узла полувагона.

Для базового варианта по методикам, описанным выше, проведен комплекс расчетов, подтверждающих его работоспособность и эффективность. В частности,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипин, Д.Я. Исследование влияния параметров сварных соединений подвижного состава на их усталостную долговечность / Д.Я. Антипин, В.В. Кобищанов, А.М. Высоцкий // Повышение эффективности транспортных машин. – Брянск, 2017. – С. 183-190.
2. Гончаров, П.С. *NX Advanced Simulation*. Инженерный анализ [Текст] / П.С. Гончаров. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
3. Антипин, Д.Я. 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-й Международной научно-практической конференции. – Курск, 2015. – С. 342-345.
4. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин [Текст]: Учеб. пособ. для машиностр. спец. Вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
5. Погорелов, Д.Ю. Алгоритмы моделирования динамики систем тел с большим числом степеней свободы [Текст] / Д.Ю. Погорелов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4(2). – С. 278-279.
1. Antipin, D.Ya. Investigations of rolling-stock welded joints parameters impact upon their fatigue life / D.Ya. Antipin, V.V. Kobishchanov, A.M. Vysotsky // *Transport Machinery Effectiveness Increase*. – Bryansk, 2017. – pp. 183-190.
2. Goncharov, P.S. *NX Advanced Simulation*. Engineering Analysis [Text] / P.S. Goncharov. – M.: DMK Press, 2012. – pp. 504.
3. Antipin, D.Ya. Industrial program complex use for investigations of rail transport structure dynamic loading / P.I. Shalupina, D.Ya. Antipin // *Innovations, Quality and Service in Engineering and Technologies: Proceedings of the V-th Inter. Scientific-Pract. Conf.* – Kursk, 2015. – pp. 342-345.
4. Kogaev, V.P. *Strength and Wear-Resistance of Machinery* [Text]: Manual for Special Engineering Colleges / V.P. Kogaev, Yu.N. Drozdov. – M.: Higher School, 1991. – pp. 319.
5. Pogorelov, D.Yu. Algorithms for system dynamic modeling of bodies with large number of freeness

модернизация шкворневого узла по предлагаемому варианту позволила снизить максимальные действующие напряжения в шкворневом узле на 27 % и увеличить срок службы элементов сварного соединения до 29 лет.

6. Додонов, А.В. Уточненный расчет прочности кузова полувагона при разгрузке на вагонопрокидывателе / А.В. Додонов, И.А. Хиллов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 3 (31). – С.41-45.
7. Расин, Д.Ю. Обоснование рациональной конструкции шкворневого узла рамы полувагона методами компьютерного моделирования [Текст] / Д.Ю. Расин, Д.Я. Антипин // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 139-142.
8. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин [Текст] / Е.К. Почтенный. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
9. Грачева, Л.О. Спектральный анализ вынужденных колебаний вагона при случайных неровностях железнодорожного пути и выбор параметров рессорного подвешивания / Л.О.Грачева // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт. – 1967. – Вып. 347. – С. 151-168.
10. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
- [Text] / D.Yu. Pogorelov // *Bulletin of Lobachevsky University of Hizhny Novgorod*. – 2011. – No.4(2). – pp. 278-279.
6. Dodonov, A.V. Adjusted computation of gondola car body strength while unloading on car tipper / A.V. Dodonov, I.A. Khilov // *Cars and Carload Economy*. – 2012. – No.3 (31). – pp. 41-45.
7. Rasin, D.Yu. Efficient Design Substantiation for pivot joint of gondola car frame through methods of computer modeling [Text] / D.Yu. Rasin, D.Ya. Antipin // *Problems and Outlooks of Car-Building Industry: Proceedings of the VIII-th All-Russian Scientific-Tech. Conf.* – Bryansk: BSTU, 2019. – pp. 139-142.
8. Pochtenny, E.K. *Life Prediction and Machinery Fatigue Diagnostics* [Text] / E.K. Pochtenny. – Minsk: Science and Engineering, 1983. – pp. 246.
9. Grachyova, L.O. Spectral analysis of car forced oscillations at random railway roughness and parameter choice for spring suspension / L.O. Grach-

yova // Proceedings of VNIIZhT. – М.: Transport. – 1967. - Issue 347. – pp. 151-168.

10. Vinokurov, V.A. *Welded Structures. Destruction Mechanics and Working Capacity Criteria* / V.A.

Vinokurov, S.A. Kurkin, G.A. Nikolaev. – М.: Mechanical Engineering, 1996. – pp. 576.

Ссылка для цитирования:

Кобищанов В.В., Антипин Д.Я., Расин Д.Ю., Мануева М.В. Развитие методов анализа прочности и надежности несущих конструкций подвижного состава с использованием методов математического моделирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 29–37. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-29-37.

Статья поступила в редакцию 30.01.20.

Рецензент: д.т.н., зав. отделением «Динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры» АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»

Волохов Г.М.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 12. 02. 20.

#### Сведения об авторах:

**Кобищанов Владимир Владимирович**, д.т.н., профессор кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: psbstu@yandex.ru.

**Антипин Дмитрий Яковлевич**, к.т.н., доцент, директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, e-mail: adya24@rambler.ru.

**Kobishchanov Vladimir Vladimirovich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Bryansk State Technical University, e-mail: psbstu@yandex.ru.

**Antipin Dmitry Yakovlevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Director of Educational-Scientific Institute of Transport, Bryansk State Technical University, e-mail: adya24@rambler.ru.

**Мануева Марина Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: mari\_s@mail.ru.

**Расин Дмитрий Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: dmrr1@rambler.ru.

**Manueva Marina Vladimirovna**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Bryansk State Technical University, e-mail: mari\_s@mail.ru.

**Rasin Dmitry Yurievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Bryansk State Technical University, e-mail: dmrr1@rambler.ru.