

УДК 629.464.2:004.94

А.О. ШИМАНОВСКИЙ, д-р техн. наук; К.В. МАКСИМЧИК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЦЕВОГО ПОЛУВАГОНА СНЕГОУБОРОЧНОГО ПОЕЗДА СМ-2

Анализируется прочность металлоконструкции концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2. Разработана геометрическая модель его несущей конструкции в среде Creo Parametric. Выполнено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием модуля статического анализа Static Structural программного комплекса ANSYS Workbench при нормативных режимах нагружения. Получены схемы распределения напряжений и определен коэффициент запаса прочности. Установлено, что максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений наблюдаются в местах соединения хребтовой балки со шкворневой, а также в боковой балке в зоне установки выбросного конвейера. Полученные результаты являются основой для разработки рекомендаций по усилению конструкции рамы концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2.

Ключевые слова: снегоуборочный поезд, конечной полувагон, метод конечных элементов, нормативные режимы нагружения, напряженно-деформированное состояние

Введение. Снегоуборочный поезд СМ-2 предназначен для очистки железнодорожных путей колеи 1520 мм и станций от снега (мусора в летний сезон). К настоящему времени подавляющее большинство эксплуатируемых машин данной модели выработали свой нормативный ресурс. Единовременная замена всех единиц техники невозможна, поэтому возникает необходимость выполнения исследований с целью анализа возможности продления срока службы снегоуборочных машин [1].

Существует значительное число публикаций, посвященных продлению срока службы железнодорожного подвижного состава. Так, в работах [2, 3], опираясь на результаты моделирования напряженно-деформированного состояния вагонов, оценивают их усталостные повреждения и долговечность конструкций. Также на основе моделирования в статье [4] рассмотрено воздействие сверхнормативных нагрузок на полувагон при движении и разгрузке. Продemonстрировано наличие всплесков напряжений в ответственных узлах и предложены рекомендации по оптимизации силовой схемы кузова.

Из-за технической сложности и действия различных нагрузок и факторов, которые математически трудно учесть, не всегда удается с достаточной точностью оценить состояние несущих металлоконструкций в реальных условиях [5]. Поэтому для оценки долговечности применяется физическое моделирование, которое наиболее точно отражает основные физические и другие параметры, присущие системе [6–8].

В работе [9] на основе особенностей нагружения, результатов моделирования напряженно-деформированного состояния разработана схема вырезки образцов несущей конструкции рамы тележки дизель-поезда ДРБ1 для определения прочностных характеристик. Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса специализированного вагона хоппер-дозатора на основе результатов виртуальных испытаний приведена в статье [10], а в публикации [11] предложен алгоритм ее автоматизации.

Разработке процедур, позволяющих назначить новый срок службы железнодорожному тяговому и подвижному составу, посвящена работа [12]. Установлены участки металлоконструкций, наиболее подверженные износу в эксплуатационный период времени, с целью

проведения профилактических мероприятий по их своевременному устранению. Выявлены ограничения, которые должны учитываться при назначении нового срока службы, и даны предложения по актуализации нормативных документов.

В статье [13] на основе испытаний вагонов метрополитена с предложенными усилениями шкворневой и хребтовой балок установлено, что есть возможность продления их срока службы до 15 лет. В работе [14] предложено осуществлять упрочнение элементов хребтовой балки в районе приварки промежуточных и концевых балок, где сейчас фиксируются значительные растягивающие напряжения.

Анализ существующих публикаций показывает, что результаты компьютерного моделирования адекватно описывают напряженно-деформированное состояние подвижного состава железных дорог и могут быть приняты в качестве теоретической базы для моделирования единиц подвижного состава снегоуборочного поезда СМ-2. Однако автоматизировать решение данной задачи сложно, так как данные поезда производят малыми сериями, а их металлоконструкции отличаются в разных экземплярах, что требует индивидуального подхода при осуществлении моделирования.

Вопросам оценки прочности и продления срока службы головной машины снегоуборочного поезда СМ-2 посвящены работы [15, 16]. В них разработаны конечно-элементные модели и определены значения эквивалентных напряжений, возникающие в элементах металлоконструкции рамы. Установлено, что в некоторых зонах значения напряжений превышают допустимые и возникает необходимость усиления конструкции.

В работе [17] представлена компьютерная модель металлоконструкции кузова концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2, который отличается от иных вагонов наличием дополнительного транспортирующего оборудования. Целью данной работы является анализ прочности данного полувагона под действием продольных эксплуатационных нагрузок.

Разработка конечно-элементной модели концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2. Тестовые расчеты, представленные в работе [17], показали, что предложенные геометрическая и конечно-элементная

модели адекватно описывают напряженно-деформированное состояние рассматриваемого полувагона. В данной работе геометрическая модель несущей конструкции, разработанная в среде программы Creo Parametric, дополнена элементами крепления накопителя, питателя и выбросного конвейеров, а также узлов шкворневых балок и упоров автосцепного устройства (рисунок 1).

Построение конечно-элементной модели конечного полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 выполнено в среде программного пакета ANSYS Workbench [18, 19]. Модель представляет собой сборку, состоящую из 353 твердотельных деталей, ограниченных в трех плоскостях, в результате чего между ними создан 731 контакт. Материал деталей — сталь с характеристиками: модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7800$ кг/м³. Параметры сетки конечных элементов: характерный размер конечного элемента — 50 мм, количество узлов — 1 697 091, число конечных элементов — 539 719 (рисунок 2).

Разработанная модель позволяет рассматривать любое сочетание и вид эксплуатационных нагрузок и, тем самым, оценить несущую способность рассматриваемой конструкции.

Снегоуборочный поезд СМ-2 допускается транспортировать в составе грузового поезда, поэтому оценку прочности целесообразно производить в соответствии со стандартом [20]. Данный документ напрямую не определяет порядок расчета специального подвижного состава,

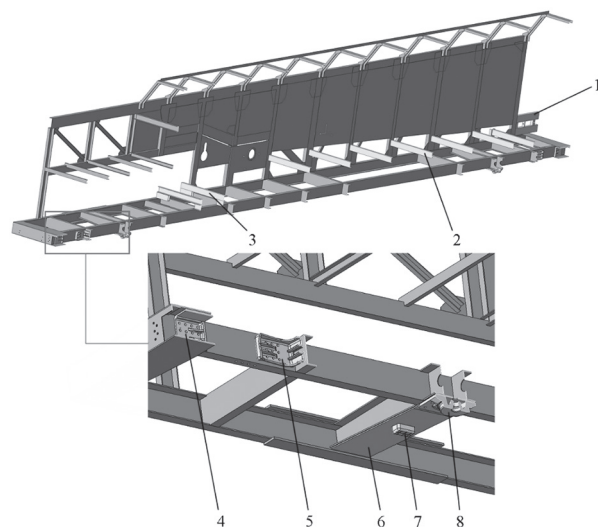


Рисунок 1 — Сечение геометрической модели рамы конечного полувагона снегоуборочного поезда СМ-2:
1 — узел натяжителя транспортера-накопителя; 2 — швеллеры рамы транспортера-накопителя и питателя; 3 — узел установки выбросного конвейера; 4, 5 — передний и задний упоры автосцепного устройства; 6 — лист; 7 — скользящий элемент; 8 — пятник

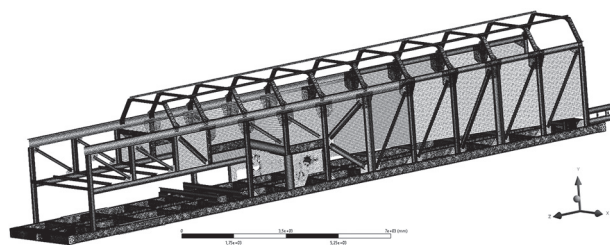


Рисунок 2 — Конечно-элементная модель рамы конечного полувагона снегоуборочного поезда СМ-2

к которому относятся снегоуборочные машины, поэтому дополнительно учтено наличие технологического рабочего оборудования и снеговой нагрузки, напрямую влияющих на напряженно-деформированное состояние несущей конструкции [21].

Прочность рам вагонов устанавливают на основе расчетов, выполняемых для различных режимов движения. В данной работе рассмотрены режим Ia, который соответствует сочетанию сил, действующих на вагон при соударении, и режим Ib трогания с места [20].

В качестве примера на рисунке 3 представлена схема приложения сил и наложения связей на конструкцию для режима Ia. Здесь принимаются во внимание следующие силы:

а) продольные: сила удара $P_{уд}$ направлена внутрь полувагона со стороны хвостовой части и приложена к опорным поверхностям заднего упора автосцепного устройства с одной стороны и уравновешена продольными силами инерции полувагона $F_{ин(к)}$, тележек $F_{ин(тел)}$ и груза $F_{ин(гр)}$ (силами инерции автосцепного устройства пренебрегаем ввиду их незначительного влияния);

б) вертикальные: силы тяжести полувагона G_k и установленного на него рабочего оборудования (будки управления $G_{будк}$, транспортера-накопителя $G_{нак}$, питателя и выбросного конвейера $G_{тр}$), а также силы тяжести груза (снега) $G_{гр}$; вертикальная составляющая сил инерции $F_{ин}^B$, действующих на составные части конструкции. Нагрузка от сил тяжести груза учтена путем приложения гидростатического давления к опорным поверхностям полувагона.

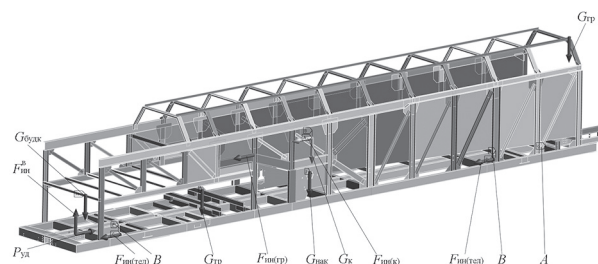


Рисунок 3 — Расчетная схема модели рамы конечного полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 для режима Ia:

$P_{уд}$ — продольная сила удара; $F_{ин}^B$ — вертикальная составляющая сил инерции; $G_{будк}$ — сила тяжести будки управления; $G_{гр}$ — сила тяжести груза; A, B — связи; $F_{ин(тел)}$ — продольная сила инерции тележки; $F_{ин(к)}$ — продольная сила инерции полувагона; G_k — сила тяжести полувагона; $G_{нак}$ — сила тяжести транспортера-накопителя; $F_{ин(гр)}$ — продольная сила инерции груза; $G_{тр}$ — сила тяжести транспортера-питателя и выбросного конвейера

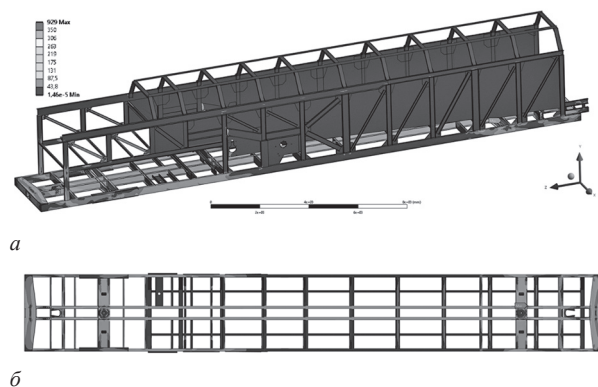


Рисунок 4 — Схема распределения эквивалентных напряжений (МПа) для режима Ia: а — аксонометрия; б — вид снизу

Таблица — Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения по расчетным режимам

Наименование элемента	Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения по режимам, МПа			
	Ia (удар в хвостовую часть)	Ia (удар в головную часть)	Iб (трогание со стороны хвостовой части)	Iб (трогание со стороны головной части)
Хребтовая балка в зоне присоединения к шкворневой	326,24	380,06	378,97	330,78
Боковая балка в зоне установки выбросного конвейера	206,65	380,14	212,22	198,26

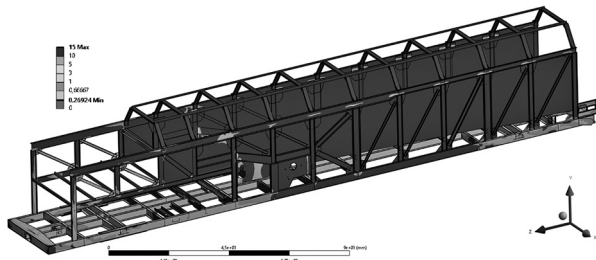


Рисунок 5 — Схема распределения коэффициента запаса прочности для режима Ia

На модель были наложены связи: запрещены продольные перемещения заднего упора автосцепного устройства *A*, расположенного с головной стороны полувагона; вертикальные и поперечные — пятники *B*; запрещены вертикальные перемещения точек возможного контакта со скользными.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния. В ходе выполнения расчетов получены распределения напряжений и деформаций в конструкции. На рисунках 4, 5 представлены схема распределения эквивалентных напряжений и коэффициента запаса прочности для режима Ia.

Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения наблюдались в области соединения шкворневой балки с хребтовой и составили 326,24 МПа (при допускаемых значениях для заданного материала 250 МПа). В некоторых точках проявились всплески напряжений, связанные с несовершенством геометрии модели. В остальных областях конструкции напряжения не превысили допускаемых значений 160 МПа.

Минимальное значение коэффициента запаса прочности составляет 0,72 (см. рисунок 5) и соответствует области с наибольшими эквивалентными по Мизесу напряжениями (см. рисунок 4). В иных местах модели коэффициент запаса превышает значения 1,5.

Сводные результаты расчетов по режимам Ia и Ib приведены в таблице. Максимальные напряжения наблюдаются в хвостовой части концевой полувагона, что обусловлено наличием в этой области выбросного конвейера, который делает конструкцию рамы менее жесткой по сравнению с головной частью. Результаты показывают, что при режиме Ia, соответствующем сжатию, наиболее неблагоприятен удар в головную часть концевой полувагона. При режиме Ib, соответствующем растяжению, наибольшие значения напряжений возникают при трогании со стороны хвостовой части полувагона.

Выводы. В ходе выполнения работы проведен анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции концевой полувагона снегоборочного поезда СМ-2 под действием предельных эксплуатацион-

ных нагрузок. Установлено, что эквивалентные по Мизесу напряжения превышают допустимые значения в зоне соединения хребтовой балки со шкворневой. Также они достаточно велики в боковой балке в области установки выбросного конвейера. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости установки дополнительных подкрепляющих элементов для обеспечения требуемой прочности конструкции. Также выполненное моделирование позволяет рекомендовать положение контрольных точек размещения тензометрических датчиков при проведении натурных испытаний.

Список литературы

1. Максимчик, К.В. Снегоборочный поезд СМ-2. Анализ текущего состояния парка техники в Республике Беларусь / К.В. Максимчик, В.Л. Моисеенко // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. — 2022. — № 2(45). — С. 52–54.
2. Kassner, M. Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods / M. Kassner // International Journal of Fatigue. — 2012. — Vol. 34, iss. 1. — Pp. 103–111. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.01.020>.
3. Evaluation of railway vehicle car body fatigue life and durability using a multi-disciplinary analysis method / B. Miao [et al.] // International Journal of Vehicle Structures and Systems. — 2009. — Vol. 1, no. 4. — Pp. 85–92. — DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.1.4.05>.
4. Морозов, Д.В. Моделирование НДС кузова полувагона на прочность при воздействии сверхнормативных нагрузок / Д.В. Морозов, И.Ю. Ермоленко // Молодая наука Сибири. — 2024. — № 1(23).
5. Билятдинов, К.З. Об основах методологии оценки качества больших технических систем в процессе эксплуатации / К.З. Билятдинов, М.В. Мордвинцев // International Journal of Open Information Technologies. — 2022. — Vol. 10, no. 5. — Pp. 91–98.
6. Popova, L.F. The practical application of the methodology for the QMS effectiveness assessment / L.F. Popova // Quality – Access to Success. — 2018. — Vol. 19, iss. 167. — Pp. 43–47.
7. A new method for multivariable nonlinear coupling relations analysis in complex electromechanical system / Y. Liang [et al.] // Applied Soft Computing. — 2020. — Vol. 94. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106457>.
8. Ratner, S.V. Developing a strategy of environmental management for electric generating companies using DEA-methodology / S.V. Ratner, P.D. Ratner // Advances in Systems Science and Applications. — 2017. — Vol. 17, no. 4. — Pp. 78–92. — DOI: <https://doi.org/10.25728/assa.2017.17.4.521>.
9. Путятю, А.В. Физико-механические характеристики материала несущей конструкции дизель-поезда ДРБ1 после длительной эксплуатации / А.В. Путятю, Л.В. Огородников // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Обобщен. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2022. — Вып. 11. — С. 169–175.
10. Kanavalau, Y. Evaluation techniques for residual in-use utility of the railway car hopper-batcher bearing structure with a long-term service / Y. Kanavalau, A. Putsiata // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 134. — Pp. 57–63. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.039>.
11. Путятю, А. В. Автоматизация расчета ресурса несущих конструкций грузовых вагонов после длительной эксплуата-

- ции / А. В. Путятю // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. — 2022. — № 1(44). — С. 43–46.
12. Рафиков, Р.Х. Порядок постановки на производство тягового и нетягового подвижного состава и их элементной базы, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», предприятиями машиностроительного и ремонтного комплекса с целью установления им нового назначенного срока службы / Р.Х. Рафиков, А.С. Шинкарук, Н.А. Горюнов // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. — 2024. — Т. 21, № 1. — С. 125–141. — DOI <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-01-125-141>.
 13. Закс, М.Н. Продление срока службы вагонов метрополитена / М.Н. Закс, И.А. Рюмин // Тяжелое машиностроение. — 2021. — № 1–2. — С. 44–50.
 14. Способ увеличения продолжительности жизненного цикла пассажирского плацкартного вагона / Д.Г. Евсеев [и др.] // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. — 2021. — № 6(103). — С. 47–52. — DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-6-47-52>.
 15. Балтабаев, А.С. Оценка остаточного срока службы снегоуборочной техники / А.С. Балтабаев // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 3(34). — С. 76–78.
 16. Балтабаев, А.С. Оценка прочности вагонов-снегоочистителей при коррозионном утонении их базовых узлов / А.С. Балтабаев, М.В. Зимакова, А.С. Сараев // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. — 2011. — № 3(28). — С. 34–39.
 17. Максимчик, К.В. Конечно-элементное моделирование деформирования рамной конструкции вагона снегоуборочного поезда СМ-2 / К.В. Максимчик, А.О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. — 2023. — № 16. — С. 142–147.
 18. Макаров, Г.И. Руководство пользователя компьютерной программой ANSYS по расчету сварных конструкций методом конечных элементов / Г.И. Макаров. — М.: РГУНГ, 2019. — 53 с.
 19. Tickoo, S. ANSYS Workbench 2022 R1: A Tutorial Approach / S. Tickoo. — Schererville, IN: CAD/CIM Technologies, 2021. — 502 p.
 20. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: ГОСТ 33211-2014. — Введ. 01.06.2017. — Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2017. — 86 с.
 21. Максимчик, К.В. Анализ режимов нагружения концевой вагона снегоуборочного поезда СМ-2 / К.В. Максимчик // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VIII Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 30 мая 2024 г. — Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2024. — С. 266–271.

Shimanovsky A.O., Maksimchyk K.V.

Simulation of the SM-2 snowplow train end gondola car stress-strain state

The strength of the SM-2 snowplow train end gondola car metal structure is analyzed. A geometric model of the car load-bearing structure is developed in the Creo Parametric environment. Finite element modeling of the stress-strain state is performed using the Static Structural analysis module of the ANSYS Workbench software package for standard loading conditions. Stress distribution schemes are obtained, and the safety factor is determined. It is established that the maximum values of equivalent von Mises stresses are observed at the connections of the ridge and the pivot beam, as well as in the side beam at the place of the discharge conveyor installation. The obtained results are the basis for the development of the recommendations for strengthening the frame structure of the SM-2 snowplow train end gondola car.

Поступила в редакцию 05.08.2024.