

УДК 629.463.62.01

А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ РАМ ПЛАТФОРМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КОНСТРУКТИВНОМ ИСПОЛНЕНИИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ

Приведен анализ конструкций рам платформ Европейских производителей, которые имеют уменьшенную массу металлоконструкции. Разработана конструкция унифицированной концевой части рамы платформы. С ее применением разработаны конечно-элементные модели металлоконструкции платформ, отличающиеся конструктивным исполнением средней части. Произведена оценка их прочности с учетом современных нормативных требований.

Ключевые слова: вагон-платформа, концевая часть рамы, конструкция, масса тары, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель.

В последние десятилетия существенно возросла доля грузов, перевозимых в контейнерах, которые устанавливаются на специализированные платформы и закрепляются на раме с применением контейнерных упоров. В то же время размеры типовых контейнеров не обеспечивают максимально полное использование габаритных возможностей вагонов.

В Евросоюзе реализовано ряд проектов, предполагающих применение съемных и сменных кузовов. Установлено, что наиболее эффективное их использование достигается совместно со специализированными платформами. Для перевозки кузовов производства “Innofreight” разработано семейство платформ “InnoWaggon”, которые представляют собой сцеп из двух платформ с суммарной погрузочной длиной 60, 80 и 90 футов [1].

Рамы платформ выполнены из сварных профилей. Концевые части рамы унифицированы, а средние различаются длиной, что позволяет изготавливать платформы нужного размера в зависимости от потребности. Отсутствие в средней части рамы хребтовой балки позволяет получить свободное пространство, ограниченное боковыми продольными балками и раскосами, что позволяет разместить необходимые устройства сменных кузовов, которые предназначены для транспортировки жидких и сыпучих грузов.

Концевая унифицированная часть платформ “InnoWaggon” состоит из трех поперечных балок (концевой, шкворневой и средней поперечной) и боковых продольных [1]. Боковые продольные балки рамы имеют переменное по высоте сечение, которое максимально в средней части вагона. На верхних горизонтальных листах боковых балок располагаются откидные контейнерные упоры. Отрезки хребтовых балок в консольных частях частично перекрыты листом сверху и усилены вертикальными ребрами, а на промежутке

между шкворневой и средней поперечной балкой разделяются на два профиля. Затем они переходят в раскосы, обладающие переменной высотой по длине, для передачи продольных сил на боковые балки.

В рамках проекта “TransANT” [2] было спроектировано семейство платформ для перевозки съемных и сменных кузовов. Разработанные платформы имеют погрузочную длину 33, 40, 45, 48, 52, 60 и 70 футов. Они изготавливаются с применением унифицированных комплектующих. Рамы независимо от длины вагона собираются из трех модулей – двух концевых и среднего, который и определяет окончательную длину рамы, необходимую для потребителя.

Концевые модули рамы состоят из концевой 1, шкворневой 2 и хребтовой 3 балок (рисунок 1). Шкворневая и концевая балка по краям соединены при помощи отрезков боковых продольных балок 4. Дополнительно передача продольных сил с отрезков боковых балок на хребтовую осуществляется через верхний горизонтальный лист, который после шкворневой балки сужается до ширины хребтовой балки. Снизу он подкреплен вертикальными листами 5, расположенными по диагонали. Хребтовая балка концевой части рамы имеет замкнутое коробчатое сечение, которое увеличивается как по ширине, так и по высоте по мере удаления от шкворневой балки. Поперечные балки рамы сварные.

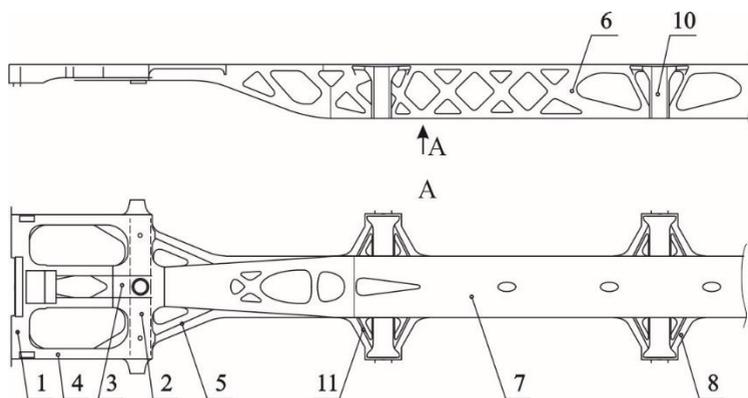


Рисунок 1 – Рама платформы с погрузочной длиной 70 футов (TransANT)

Верхний горизонтальный лист 8 хребтовой балки имеет форму трапеции с треугольным вырезом. Далее он переходит в прямоугольную площадку для установки откидных контейнерных упоров 9. Площадку снизу подкрепляет лист 10, расположенный под углом к горизонтальной плоскости таким образом, чтобы обеспечить связь с нижним горизонтальным листом хребтовой балки. Верхний и наклонный листы образуют треугольник, внутри по периметру которого приварены вертикальные усиливающие полосы 11 с треугольным вырезом.

На железных дорогах стран СНГ подавляющее большинство платформ имеют конструкцию рамы с хребтовой балкой, проходящей по всей длине кузова, с увеличенным сечением в средней части на участке между шкворневыми балками. Изготавливается хребтовая балка из двутавров, как правило, прокатных. Боковые балки могут быть выполнены из двутавра постоянного на всей длине сечения или по аналогии с хребтовой балкой иметь переменное сечение [3–5].

Для перевозки съемных или сменных кузовов требуются облегченные платформы-носители. Резервы по снижению массы можно выявить только в конструкции рамы, поскольку ходовые части, автосцепное устройство и тормозное оборудование состоят из набора стандартных элементов, доля каждого из которых в общей массе вагона значительно меньше, чем металлоконструкция рамы [6, 7].

Из сказанного выше можно сделать вывод о том, что конструкция концевого модуля рамы платформы должна быть унифицированной. Она должна включать в себя концевую, шкворневую, хребтовую и боковые продольные балки. Далее, изменяя конструкцию модуля средней части рамы, требуется определить, какая из них обладает наилучшими технико-экономическими показателями.

Разработана унифицированная концевая часть рамы (рисунок 2), состоящая из концевой 1, шкворневой 2, двух боковых продольных 3 и хребтовой 4 балок. Максимальная высота у хребтовой балки (300 мм), а минимальная – у боковой (200 мм). Концевая и шкворневая балки имеют переменную высоту. Верхние листы расположены по горизонтали, а нижние – под углом, чтобы обеспечить соединение нижних горизонтальных листов боковых и хребтовой балок. Они привариваются к вертикальному листу, образуя в поперечном сечении швеллер с толщиной стенок 10 мм.

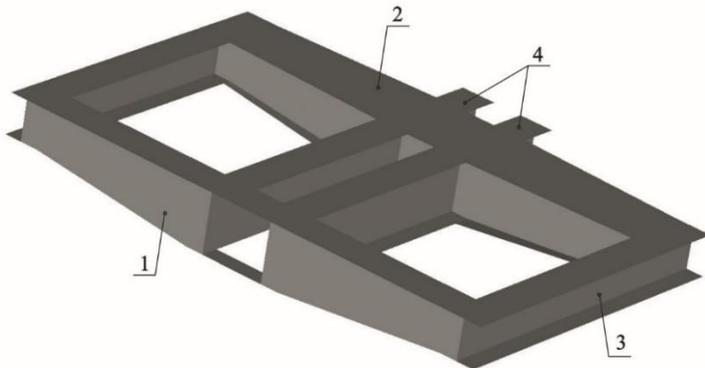


Рисунок 2 – Концевая унифицированная часть рамы платформы

Шкворневая балка имеет замкнутое коробчатое сечение. Толщина вертикальных листов – 8 мм, а верхнего и нижнего – 10 мм. Внутри балки в месте установки скользунов предусмотрены усиливающие диафрагмы.

Боковые балки имеют сечение в форме двутавров высотой 200 мм с толщиной вертикальной стенки 11 мм и горизонтальных полок 16 мм.

Хребтовая балка образована двумя двутаврами высотой 300 мм с толщиной элементов, такой же как у боковых балок.

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) рам платформ были разработаны их конечно-элементные модели, отличающиеся конструкцией средней части [8, 9].

Первый вариант конструктивного исполнения средней части (рисунок 3, а) состоит из хребтовой балки, высота сечения которой увеличивается с 300 до 600 мм в средней части. Боковые балки в средней части имеют конструкцию, аналогичную хребтовой. Поперечное сечение всех продольных балок образовано двутаврами с толщиной вертикальных стенок 11 мм и горизонтальных полок 16 мм. В середине предусмотрена основная поперечная балка, представляющая собой сварной двутавр постоянной высоты. Толщина горизонтальных элементов 16 мм, а вертикального листа 10 мм.

Второй вариант конструктивного исполнения средней части (рисунок 3, б) отличается от первого конструкцией боковых и основной поперечной балок. В этом случае боковые балки выполнены в виде двутавра высотой 200 мм на всей длине. Основная поперечная балка представляет собой сварной двутавр переменной высоты. Толщины элементов сечений всех балок аналогичны первому варианту конструкции.

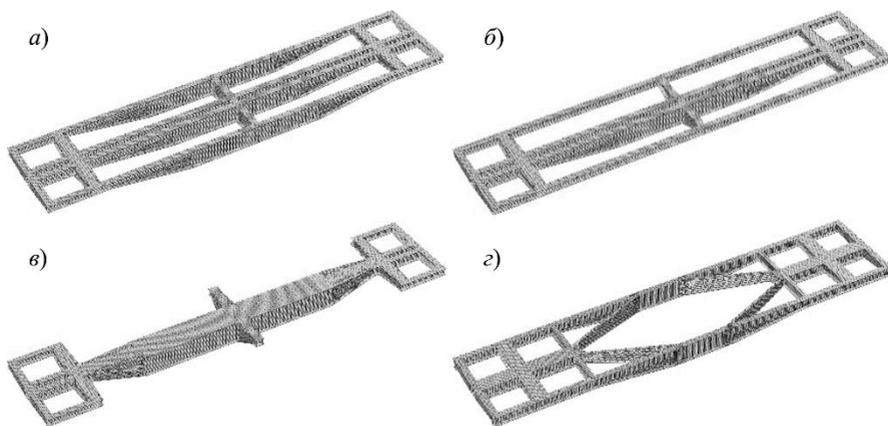


Рисунок 3 – Конечно-элементные модели рам платформ различного конструктивного исполнения

В *третьем варианте* конструктивного исполнения средней части (рисунок 3, в) за основу взята конструкция платформ проекта “TransANT”. Хребтовая балка в средней части имеет замкнутое коробчатое сечение с одинаковой высотой и шириной 700 мм, которое уменьшается до высоты 300 мм и ширины 350 мм по мере приближения к шкворневым балкам на участках длиной 1580 мм с обеих сторон. Толщина вертикальных листов 11 мм, горизонтальных – 16 мм. Основная поперечная балка, расположенная по середине рамы, в отличие от приведенных выше вариантов имеет замкнутое коробчатое сечение переменной высоты. У хребтовой балки она максимальная и уменьшается до 200 мм к краю рамы. Толщина вертикальных листов 10 мм, горизонтальных – 16 мм.

Четвертый вариант конструктивного исполнения (рисунок 3, г) выполнен по аналогии с вагонами проекта “InnoWaggon”. Хребтовая балка продолжается на участке за шкворневой на длине 1470 мм, где она стыкуется с поперечной балкой, имеющей поперечное сечение в виде двутавра (толщина горизонтальных и вертикальных листов 10 мм), а в дальнейшем переходит в раскосы, которые соединяют ее с боковыми продольными балками рамы. В средней части боковая балка увеличивает свое сечение до 700 мм, причем имеет толщину вертикальных элементов 11 мм, горизонтальных – 16 мм.

Наибольшая масса металлоконструкции рамы соответствует первому рассмотренному варианту. Второй легче на 9 %, третий и четвертый – на 7,4 и 10,5 % соответственно.

Приведенные на рисунке 3 конечно-элементные модели, при построении которых использовались пластинчатые трех- и четырехугольные конечные элементы, позволяют осуществлять расчеты для любого вида и сочетания эксплуатационных нагрузок. Кинематические граничные условия в них включают в себя ограничение степеней свободы в местах размещения упоров автосцепного устройства и пятников.

Расчеты выполнялись для случая совместного действия продольной (сжимающей и растягивающей) сил величиной 2 МН и 2,5 МН с учетом собственного веса и вертикальной нагрузки от перевозимого груза в виде двух контейнеров (масса одного 36 т), которая составила 72 т [10]. Материал – сталь 09Г2С, предел текучести которой равен 345 МПа.

В таблице 1 представлены максимальные значения расчетных напряжений для четырех рассмотренных вариантов конструктивного исполнения металлоконструкции рамы при действии продольной растягивающей нагрузки. Анализ приведенных данных показывает, что расчетные напряжения для первых трех вариантов конструктивного исполнения рам платформ не превышают допускаемой величины 327 МПа. При конструктивном исполнении, соответствующем четвертому варианту, для значительного числа элементов расчетные напряжения превысили допускаемые, а также предел текучести стали 345 МПа. В частности, максимальный уровень расчетных напряжений наблюдается

в средней части боковой продольной балки (нижний горизонтальный лист) и на 39 % превышает допускаемые напряжения. Кроме того, расчетные напряжения оказались больше допускаемых в местах соединения верхнего листа шкворневой и хребтовой балок, а также нижнего листа боковой балки с раскосом. Отметим, что полученный результат не означает, что вагоны проекта “InnoWaggon” изначально не соответствуют требованиям прочности, поскольку они рассчитаны исходя из иных требований [11, 12].

Таблица 1 – Максимальные значения напряжений по конструктивным группам при действии продольной растягивающей нагрузки

В мегапаскалях

Конструктивная группа	Варианты конструктивного исполнения			
	1	2	3	4
Хребтовая балка:				
– концевая часть	200	190	200	271
– средняя часть	170	232	193	219
Шкворневая балка	278	265	258	435
Боковая балка:				
– концевая часть	209	203	186	196
– средняя часть	95	92	–	454
Концевая балка	258	232	164	262
Поперечная балка	105	154	95	222
Раскосы	–	–	–	389
Поперечные балки вспомогательные	–	–	–	265

Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что четвертый вариант конструктивного исполнения рамы обладает недостаточной прочностью средней части. Предлагаемая конструкция нуждается в усилении и в дальнейших расчетах на действие продольной сжимающей силы не рассматривалась. Вместо нее рассчитывалась конструкция рамы, аналогичная второму варианту, но отличающаяся от него наличием в средней части хребтовой балки замкнутого коробчатого сечения с толщиной вертикальных и горизонтальных листов 12 мм. При таком конструктивном исполнении масса конструкции не возросла.

Расчет на продольную сжимающую нагрузку показал, что значения максимальных напряжений по всем конструктивным группам в основном ниже, чем у второго варианта конструкции на 1–2 % за исключением поперечной балки рамы, где они выросли на 10 % и составили 186 МПа.

Результаты выполнения прочностных расчетов, в ходе которых были получены расчетные значения напряжений для всех конструктивных вариантов рам, представлены в таблице 2. Приведенные значения максимальных напряжений демонстрируют, что третий вариант конструкции не соответствует существующим требованиям прочности. Уровень напряжений в нижнем листе

хребтовой балки превышает допускаемые значения 327 МПа в зоне перехода к увеличенному сечению хребтовой балки. В остальных элементах конструкции платформ расчетные напряжения находятся в допускаемых пределах.

Таблица 2 – Максимальные напряжения при продольной сжимающей нагрузке
В мегапаскалях

Конструктивная группа	Варианты конструктивного исполнения			
	1	2	3	4
Хребтовая балка:				
– концевая часть	209	209	343	245
– средняя часть	232	307	468	304
Шкворневая балка	321	321	278	321
Боковая балка				
– концевая часть	190	206	180	206
– средняя часть	167	144	–	144
Концевая балка	258	314	167	307
Поперечная балка	140	190	229	249

Для большинства конструктивных групп минимальный уровень напряжений наблюдается при первом варианте конструктивного исполнения рамы. Второй вариант отличается более высоким уровнем напряжений в элементах концевой, поперечной и боковой балок в концевой части, а для средней части боковой балки, наоборот, наблюдается их снижение с 167 до 144 МПа. Напряженное состояние рамы для четвертого варианта по большинству конструктивных групп изменилось незначительно. Наибольший рост напряжений наблюдается в элементах поперечной балки – с 190 до 249 МПа.

Таким образом, результаты выполненного анализа показывают, что наибольшую массу тары имеет конструкция рамы с боковыми продольными балками переменного сечения. Остальные модификации имеют меньшие массы, отличие которых находится в пределах $\pm 1,5\%$.

На основании выполненных исследований по оценке напряженно-деформированного состояния рам платформ с различным конструктивным исполнением средней части установлено, что рамы платформ, имеющих конструктивное построение по аналогии с проектами “TransANT” и “InnoWaggon” не соответствуют актуальным требованиям прочности. Данные конструкции нуждаются в усилении средней части рамы.

Наиболее приемлемым по уровню максимальных расчетных напряжений и массе тары является второй вариант конструктивного исполнения средней части рамы (вариант с боковыми балками постоянного сечения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Пигунов, А. В.** Европейские разработки в области реализации концепции применения съёмных кузовов / А. В. Пигунов, В. В. Пигунов, П. А. Дашук // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14. – С. 183–189.

2 Superstructures industry-specific modular superstructures for optimized logistics solutions [Электронный ресурс]: Интернет-портал. Австрия – Линц. – Режим доступа : <https://www.transant.com/en/The-TransANT/Superstructures/>. – Дата доступа : 12.09.2022.

3 **Пигунов, В. В.** Конструкция, теория и расчет вагонов : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / В. В. Пигунов, А. В. Пигунов. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 466 с.

4 **Пастухов, И. Ф.** Вагоны : учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / И. Ф. Пастухов, В. В. Лукин, Н. И. Жуков. – М. : Транспорт, 1988. – 280 с.

5 **Бубнов, В. М.** Совершенствование конструкции подвижного состава для перевозки контейнеров / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Л. Гуржи // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2009. – № 26. – С. 11–14.

6 **Бороненко, Ю. П.** Перспективы внедрения вагонов со съёмными кузовами увеличенной грузоподъёмности / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 437–451.

7 **Бороненко, Ю. П.** Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съёмных кузовов на железнодорожных платформах / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3 (70). – С. 29–32.

8 **Троицкий, П. С.** Обоснование снижения массы рамы вагона-платформы для перевозки контейнеров в модульных грузовых электропоездах / П. С. Троицкий // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 70–84.

9 **Chlus, K.** Numerical standard tests of railway carriage platform / K. Chlus, W. Krasoń // Journal of KONES. – 2012. – Vol. 19, no. 3. – С. 59–64.

10 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : ГОСТ 33211–2014. – Введ. 01.07.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

11 Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models / С. Baykasoglu [et al.] // International Iron & Steel Symposium, 02-04 April 2012, Karabük, Türkiye. – Karabük, 2012. – P. 579–586.

12 **Sepe, R.** Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car / R. Sepe, A. Pozzi // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2015. – Vol. 9, no. 33. – P. 451–462.

A. V. PIHUNOU, V. V. PIHUNOU

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

STRENGTH ANALYSIS OF FLATCAR FRAMES WITH DIFFERENT STRUCTURAL PERFORMANCE OF THE MIDDLE PART

The analysis of the frame structures of flatcars of European manufacturers with a reduced mass of metal structures is presented. The design of the flatcar frame unified end part is developed. With the use of this design the finite element models of the flatcar metal structures are developed and they differ in the middle part design. Their strength is evaluated corresponding to the modern regulatory requirements.

Keywords: flatcar, frame end part, structure, tare weight, stress-strain state, finite element model.

Получено 10.11.2022