

Универсальный профиль для хребтовой балки вагонов



А. М. Соколов,
д. т. н., первый зам.
генерального директора
по стратегии и продукту
ПАО «НПК ОВК»



Ю. В. Савушкина,
к. э. н., директор Дирекции
аналитических исследований
ООО «ВНИЦТТ»



А. Ю. Новоселов,
руководитель отдела
«Полувагоны»
ООО «ВНИЦТТ»



Д. С. Коротков,
инженер 2-й категории
ООО «ВНИЦТТ»

В статье обоснован выбор нового профиля для хребтовой балки и представлен ряд конструктивных решений рам грузовых вагонов разного типа. Правильность предложенных решений, обеспечивающих увеличение грузоподъемности вагонов и снижение себестоимости их изготовления, подтверждена расчетными обоснованиями и результатами испытаний.

Снижение материалоемкости конструкции обеспечивает улучшение основных технико-экономических параметров вагона, таких как грузоподъемность и себестоимость. Один из способов снижения материалоемкости — использование более легких гнутых профилей вместо горячекатаных, изготавливаемых немногими сталепрокатными заводами на сложном дорогостоящем оборудовании. Все вагоностроительные предприятия провели значительный объем работ по внедрению в конструкции разных узлов выпускаемых грузовых вагонов элементов из гнутого профиля. Особенно широкое распространение гнутые профили получили в конструкциях кузовов полувагонов, хопперов, крытых вагонов. Из гнутых профилей изготавливаются обвязки, стойки и балки боковых и торцевых стен, номенклатура заменяемых элементов охватывает практически всю конструкцию. Однако обычно элементы кузова, изготовленные из гнутого профиля, используются в качестве вспомогательных составляющих более крупных узлов, воспринимающих эксплуатационные нагрузки. Применение таких элементов не предполагает значительного изменения конструкции и технологии изготовления вагонов. Новым направлением снижения материалоемкости может стать применение гнутых профилей при изготовлении основных несущих элементов, например, хребтовой балки. Разработка такого универсального профиля для грузовых вагонов была выполнена ООО «ВНИЦТТ» совместно с вагоностроительными предприятиями тихвинской промплощадки: АО «Тихвинский вагоностроительный завод» и АО «ТихвинХимМаш».

Из литературы [1–4] по конструкциям грузовых вагонов нетрудно проследить историю изменения основного не-

сущего элемента рамы. В 20–30-е годы прошлого века при производстве четырехосных цистерн и крытых вагонов применялась хребтовая балка, изготовленная из двух прокатных швеллеров сечением 300×100×11 мм, перекрытых сверху листом. Двухосные полувагоны и крытые вагоны имели хребтовую балку с уменьшенным сечением, выполненную из двух швеллеров № 24 с усиливающими накладками. Продольная балка четырехосных хопперов и ряда полувагонов состояла из двух вертикальных стенок 290×10 мм, перекрытых сверху листом.

В послевоенное время в отечественном вагоностроении появился и получил широкое распространение горячекатаный зетовый профиль. В 1948–1950 гг. хребтовые балки крытых вагонов стали изготавливать из зетовых профилей сечением 310×11×185×44×125×20 мм. С 60-х годов началось производство крытых вагонов, а затем и полувагонов с балкой из двух элементов зетового проката с уменьшенной толщиной стенок (310×9×183×10,5×130×16 мм). В 1969 г. начался выпуск полувагонов с хребтовой балкой, образованной двумя зетобразными профилями, и балкой двутаврового профиля № 19. В конструкции вагонов-цистерн долгое время применялась хребтовая балка, выполненная из двух горячекатаных швеллеров № 30В по ГОСТ 5267.1, перекрытых сверху и снизу листами. В четырехосных крытых вагонах для легковых автомобилей применяли два швеллера № 30, соединенные между собой диафрагмами, а в специализированных полувагонах-хопперах — два двутавра № 45, перекрытые сверху и снизу листами. В настоящее время большая часть парка вагонов имеет хребтовую балку из зетового профиля по ГОСТ 5267.3–90.

Таблица 1. Разработанные элементы рамы

Конструктивный узел	Существующая рама	Проектируемая рама
Хребтовая балка	Из зетовых профилей по ГОСТ 5267.3–90	Из омега-профиля, из листа толщиной 12 мм
Промежуточные балки	—	Отличающиеся по геометрии детали в местах соединения с хребтовой балкой
Шкворневые, концевые балки	—	Усиливающие накладки; листы измененной толщины; а также отличающиеся по геометрии детали в зонах соединения с хребтовой балкой
Надпятники	Литые	Сварной конструкции
Упоры	Литые, крепление заклепками	Вновь разработанные, приварные
Пятники	4Ш по ОСТ 24.052.05	Вновь разработанные с увеличенной привалочной плитой

Из представленного краткого обзора видно, что значительная часть профилей, применяемых в отечественном вагоностроении, горячекатаные. В то же время в грузовых вагонах США и Европы широко используются гнутые элементы, например, в конструкциях, где хребтовая балка служит как основным, так и вспомогательным элементом в системе передачи продольных нагрузок. В представленной работе выполнен выбор нового профиля для хребтовой балки и разработан ряд конструктивных решений рам грузовых вагонов разного типа. Кроме того, проведены необходимые расчетные обоснования и испытания, подтверждающие правильность предложенных решений.

В процессе выбора сечения хребтовой балки из гнутого листового проката был проанализирован ряд вариантов, некоторые из них приведены на рис. 1.

Замкнутая прямоугольная труба имеет наиболее рациональную форму сечения по критерию соотношения моментов сопротивления изгибу и площади поперечного сечения, однако при проведении гибочных операций трудно выдержать постоянную величину зазора между загнутыми кромками и параллельность вертикальных стенок, к которым затем присоединяются упоры. Главный недостаток такого решения — невозможность выполнения двухстороннего продольного сварного шва. Для выполнения качественного одностороннего сварного шва требуется разделка кромок, а значит, необходимо дополнительное технологическое оборудование.

Замкнутая прямоугольная труба из двух продольно сваренных швеллеров в сравнении с предыдущим вариантом проще в изготовлении, так как технология изготовления таких профилей хорошо отработана и широко применяется на производстве. При этом возникает необходимость выполнения двух продольных сварных швов.

Вариант изготовления хребтовой балки из двух швеллеров, соединенных в двутавровое сечение, имеет все недостатки предыдущих вариантов, а также более низкие моменты инерции и сопротивления изгибу относительно вертикальной оси. Кроме того, данное сечение не совместимо с применяемыми для комплектации вагонов упорами автосцепного устройства.

Применение омегаобразного сечения позволяет выполнять установку упоров, не требует сварочных работ и механической обработки при разделке кромок сварных соединений. Характеристики профиля практически не уступают замкнутому прямоугольному сечению. Таким образом, выбор омегаобразного сечения преимущественный. По сравнению с традиционно применяемым зетовым горячекатаным новым профилем имеет следующие преимущества:

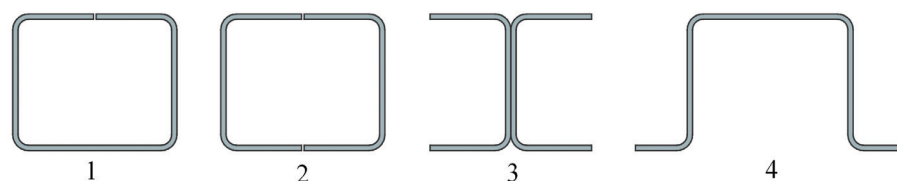


Рис. 1. Виды сечений хребтовой балки из гнутого листового проката: 1 — прямоугольная труба; 2 — прямоугольная труба из двух С-образных профилей; 3 — двутавр из двух С-образных профилей; 4 — омегаобразный профиль

- возможность использования листов разной толщины в зависимости от нагрузок, которые испытывает хребтовая балка в составе вагона определенного типа;

- возможность применения материала с более высокими механическими свойствами, чем у зетового профиля;

- в отсутствие продольного сварного шва нет необходимости удаления его усиления.

Стандартное сечение хребтовой балки грузовых вагонов, изготовленное из зетового профиля, позволяет передать продольные сжимающие и растягивающие эксплуатационные нагрузки без превышения допускаемых напряжений. Следует отметить, что применение горячекатаного зетового профиля на некоторых видах подвижного состава избыточно. Например, в глухонных полувагонах и крытых вагонах часть продольной нагрузки передается через настил пола. В люковых полувагонах часть продольной нагрузки передается через балку двутаврового сечения, на которую крепятся крышки люков.

Погонная масса омегаобразного профиля, разработанного для полувагонов, на 24 кг меньше горячекатаного. При изготовлении полувагона со стандартной длиной по осям сцепления автосцепок снижение массы тары составляет 300 кг.

Для вагонов, у которых продольная нагрузка полностью передается хребтовой балкой, например, на вагонах-цистернах рамной конструкции, целесообразно применять омегаобразный профиль большей толщины или с более высокими механическими свойствами стали.

Для вагонов-хопперов, у которых продольная нагрузка в консольной части почти полностью передается хребтовой балкой, а в центральной распределяется на элементы кузова, целесообразно комбинировать омегаобразный профиль различных значений толщины.

При изготовлении омегаобразных профилей используется универсальный

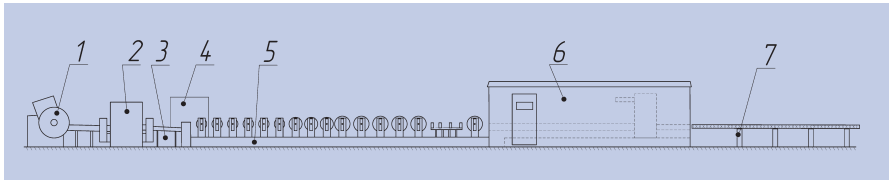


Рис. 2. Схема линия профилирования: 1 – ролонная тележка и разматыватель; 2 – правильная машина со столом раскрытия рулона и подачи полосы; 3 – передаточный стол; 4 – шкафы управления; 5 – универсальный стан холодной формовки; 6 – роботизированная система плазменной резки; 7 – выходной рольганг

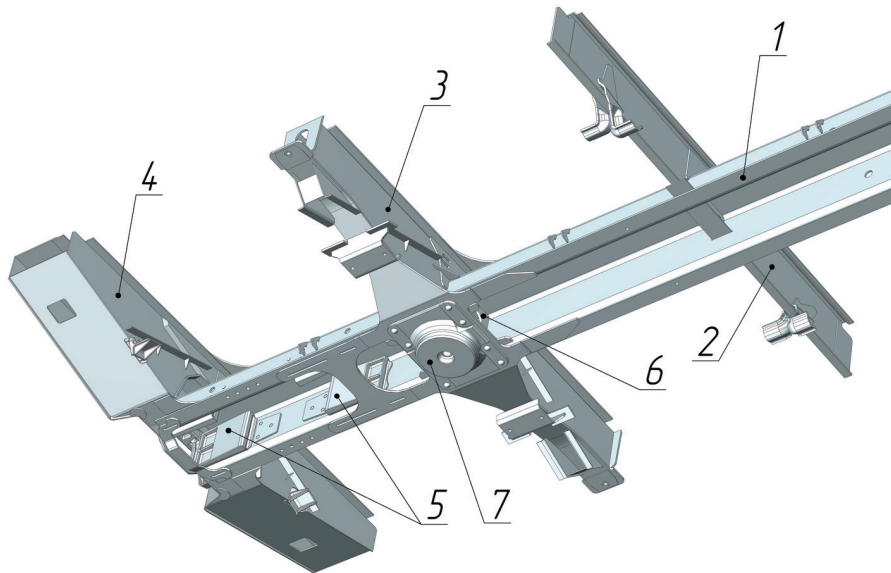


Рис. 3. Рама полувагона:
1 – хребтовая балка из омегаобразного профиля; 2 – промежуточная балка;
3 – шкворневая балка; 4 – концевая балка; 5 – приварные упоры; 6 – надпятник;
7 – пятник

стан холодной формовки, входящий в состав линии профилирования. В зависимости от установленной инструментальной оснастки стан позволяет формировать омегаобразные профили из листового проката толщиной от 3 до 14 мм при высоте деталей 50–160 мм, ширине 60–200 мм, а также при ширине детали 610–650 мм и высоте 310 мм. Стан отличает возможность изготовления деталей длиной до 13 м, что соответствует длине большинства серийно выпускаемых вагонов.

В комплекс линии профилирования (рис. 2) входит оборудование, которое под управлением оператора в полуавтоматизированном режиме выполняет операции от подачи рулона стали на входе до получения готовой омегаобразной балки необходимой длины на выходе.

Работы по созданию новой конструкции рамы с гнутым профилем хребтовой балки [5–7] прежде всего были выполнены для наиболее массового типа подвижного состава – универ-

сального полувагона с разгрузочными люками. Эта задача отличалась от обычной замены профиля узла, предусматривалась переработка основных элементов рамы (рис. 3; табл. 1).

Основным ограничением при проектировании выступало требование унификации с существующей конструкцией кузова вагона, чтобы обеспечить собираемость и минимизацию технологической подготовки производства. В качестве дополнительного ограничения принималось сохранение основных размеров кузова и его объема. Критерий оценки конструкции – соблюдение требований прочности и устойчивости конструкции.

С существующим вагоном были унифицированы детали шкворневых и концевых балок, конструкция и шаг промежуточных балок рамы, двутавровый профиль хребтовой балки. Взамен зетовых профилей по ГОСТ 5267.3–90 хребтовая балка полувагона выполнена из омегаобразного профиля, материал – листовый прокат толщиной 12 мм

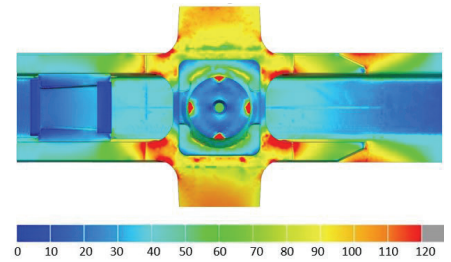


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние рамы под действием веса груза

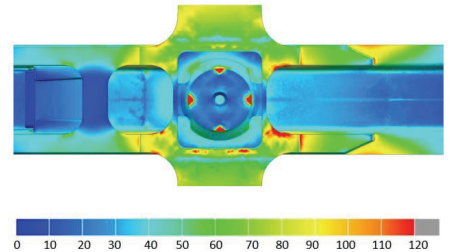


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние рамы с усилениями под действием веса груза

из стали марки 09Г2С класса прочности 345.

На основании предварительного анализа необходимых изменений конструкции в результате расчета прочности (рис. 4) были установлены зоны рамы, требующие доработки. На рис. 4 красным и серым цветом отображены зоны с максимальными напряжениями, синим цветом – с минимальными. Максимальные напряжения в зонах, требующих доработки, составляли 120 МПа. Вследствие уменьшения площади поперечного сечения и, следовательно, момента сопротивления и жесткости профиля хребтовой балки появились следующие указанные зоны:

- соединение нижних листов концевой балки с омегаобразным профилем хребтовой балки в связи с уменьшением толщины нижней полки профиля;
- нижний лист шкворневой балки и соединение нижнего, вертикальных листов с омегаобразным профилем хребтовой балки вследствие уменьшения нижней полки профиля и жесткости шкворневого узла в целом;
- консольная часть хребтовой балки в местах установки упоров автосцепного устройства.

Для снижения напряжений и повышения устойчивости нижнего листа шкворневой балки, а также уменьшения напряжений в местах соединения листов концевой и шкворневой балок с хребтовой, для увеличения запаса сопротивления усталости сварных соединений рассмотрены следующие варианты:

- изменение поперечных сечений

балок вследствие увеличения габаритных размеров и толщины листов;

- усиление накладками и изменение толщины листов с сохранением габаритных размеров балок.

Вариант увеличения высоты балки приводит к повышению уровня пола и снижению объема кузова. Увеличение расстояния между вертикальными листами шкворневой балки ведет к уменьшению размеров люковых проемов, при этом нельзя использовать унифицированные крышки разгрузочных люков. Кроме того, увеличивается ширина нижнего шкворневого листа и становится невозможным установить заклепки крепления пятников.

В связи с необходимостью минимизации изменений технологии сборки и применения имеющейся оснастки, в частности кондукторов для сборки шкворневой и концевой балок, реализацией заклепочного соединения пятников с балкой, а также по результатам анализа себестоимости изготовления принято решение о применении усиленных в виде накладок и изменении толщины нижнего и вертикальных листов шкворневой балки с сохранением габаритных размеров. В концевой балке реализованы локальные усиления.

Результаты расчета прочности доработанной конструкции приведены на рис. 5. Максимальные расчетные напряжения в доработанных зонах не превосходят 75 МПа.

В конструкции полувагона используются приварные передний и задний упоры собственного производства. Их применение вызвано различиями технологий сборки хребтовой балки. В связи с различиями допусков размеров по внутренней ширине получаемого омегаобразного профиля и по ширине стандартных упоров по ОСТ 24.152.01–77 или ГОСТ Р 52916–2008 при клепке упоров можно получить в заклепочном соединении зазоры, превышающие допустимые. При сборке хребтовой балки из двух зетов различия по ширине компенсируются поджатием в оснастке вследствие выбора зазора в месте стыка двух зетов. В омегаобразном профиле поджатие вертикальных стенок к упорам должно осуществляться с одновременным подогревом для снятия остаточных напряжений после приклепки упоров и извлечения из оснастки. Применение приварных упоров исключает необходимость нагрева хребтовой балки для снятия остаточных напряжений

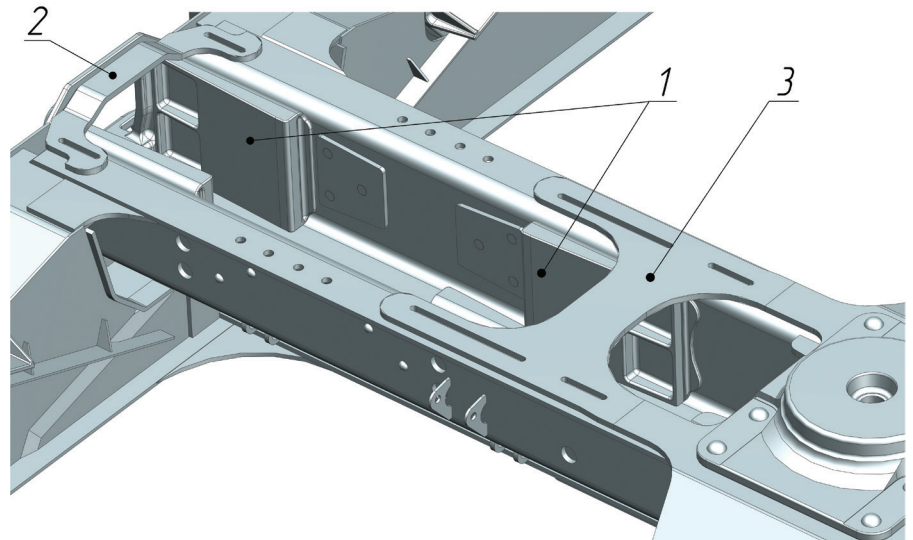


Рис. 6. Установка приварных упоров: 1 – литые угольники; 2 – перемычка-накладка переднего упора; 3 – перемычка-накладка заднего упора

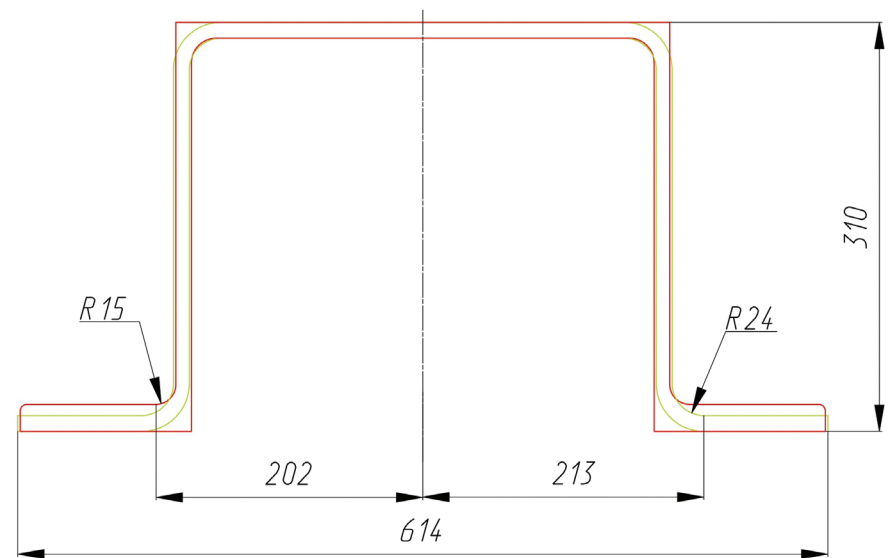


Рис. 7. Наложение контура хребтовой балки из омегаобразного профиля и зетового профиля: зеленый контур – зетобразный профиль по ГОСТ 5267.3–90; красный контур – омегаобразный профиль

и снижает себестоимость изготовления вагона.

Приварные передний и задний упоры (рис. 6) состоят из отдельных деталей, сборка которых происходит при сборке хребтовой балки и рамы. Литые угольники по отдельности привариваются к внутренним поверхностям вертикальных полок, а перемычки и накладки привариваются внахлест на наружные поверхности нижних полок омегаобразного профиля. Вследствие такой сборки компенсируются допуски на изготовление упоров и омегаобразного профиля.

В конструкции полувагона используются сварные надпятники вместо литых, применяемых в серийных полувагонах. Такая конструкция надпятников позволяет компенсировать разли-

чие допусков на внутренние размеры балок.

При использовании хребтовой балки из омегаобразного профиля потребовалось рассмотреть изменение крепления пятников. Особенности формирования омегаобразного профиля в радиусной части (рис. 7) приводят к смещению плоского участка нижней полки хребтовой балки от ее оси, что не обеспечивает полноценное формирование головки заклепки вследствие упирания гидроскобы в радиусную часть.

Рассмотрено несколько вариантов решения вопроса (рис. 8):

- использование в качестве элементов крепления пятника призонных («чистых») болтов;
- использование пятника болтов с обжимной головкой;

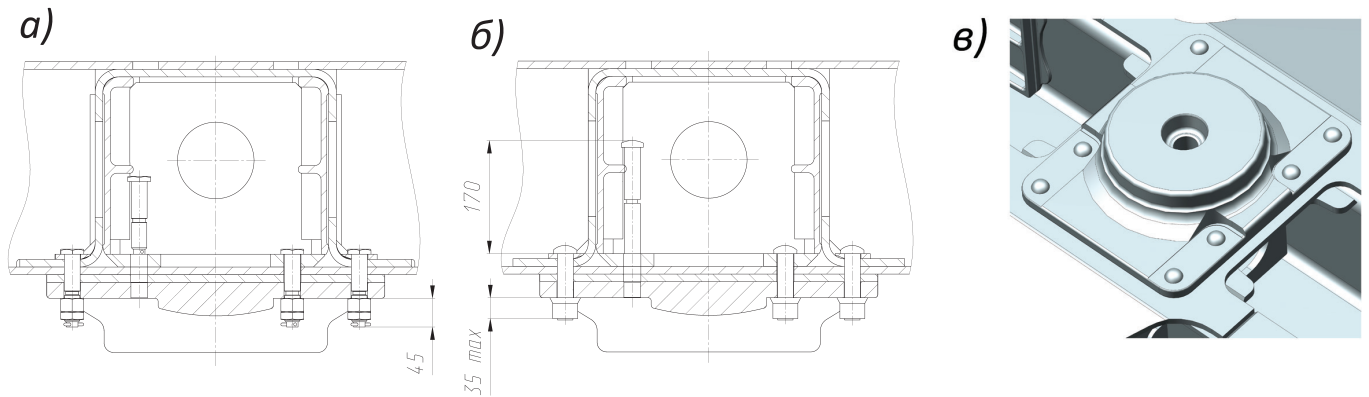


Рис. 8. Варианты крепления пятников: а) использование призонных («чистых») болтов; б) использование штифтов с обжимной головкой; в) с увеличенной привалочной плитой при использовании заклепок

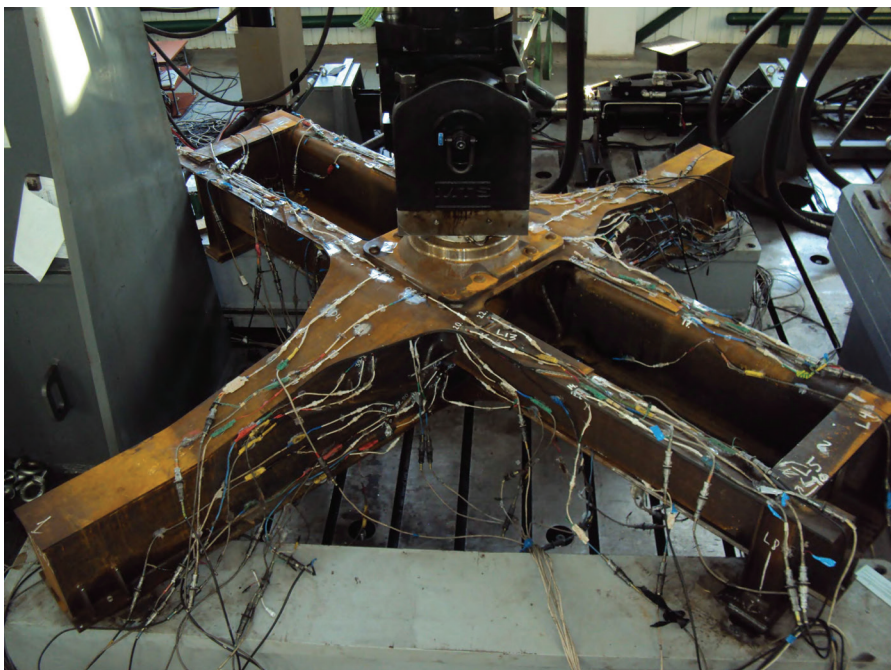


Рис. 9. Испытания макета шкворневого узла

- использование пятника с увеличенными размерами привалочной плиты.

Использование призонных («чистых») болтов или болтов с обжимной головкой имеет ряд геометрических ограничений: наддрессорная балка и внутренние ребра надпятниковой коробки лимитируют длину болта или штифта, радиусная часть нижних полок хребтовой балки из омегаобразного профиля приводит к добавлению дополнительной шайбы, устанавливаемой под головку болта (рис. 8. а, б).

Применение пятника с увеличенными размерами привалочной плиты и откорректированными привязками отверстий позволяет решить вопрос геометрической собираемости, но приводит к необходимости доработки штамповой оснастки при изготовлении пятников и корректировки расположения отверстий при их сверлении (рис. 8. в).

Последний вариант оптимален с позиций существующей технологии производства, эксплуатации и ремонта вагонов, основанной на применении

заклепочных соединений для крепления пятников. Немаловажным аргументом в пользу данного варианта выступает снижение себестоимости сборки хребтовой балки.

Результатом выполненной разработки, направленной на уменьшение себестоимости, стало снижение массы рамы полувагона с хребтовой балкой из омега-профиля относительно массы рамы серийного полувагона на 180 кг и сокращение трудоемкости выполнения сварочно-сборочных работ на 4,9 %. Общая себестоимость изготовления рамы вагона при этом снизилась на 3,5 %.

О надежности кузова того или иного грузового вагона можно судить по показателям прочности его несущих узлов. Шкворневой узел — один из наиболее нагруженных несущих узлов всех грузовых вагонов. Очень важно при проектировании узла заложить в его конструкцию необходимые прочностные характеристики, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию в процессе всего срока службы вагона. В рамках экспериментального подтверждения правильности принятых технических решений и соответствия требованиям безопасности разработан макет шкворневого узла, выполнены его нормативные расчеты, проведены испытания, подтверждающие назначенный срок службы (рис. 9).

Для подтверждения срока службы шкворневому узлу необходимо выдержать один миллион циклов нагружения до появления трещин. Наименьшее количество циклов, которое узел с хребтовой балкой из зетового профиля отстоял до появления трещины, — 1 038 000. Для узла с хребтовой балкой из омегаобразного профиля данная величина составила 1 100 000. В обеих конструкциях трещины заро-

Таблица 2. Сравнение экономических показателей разработанных и серийно выпускаемых вагонов

Показатель	Полувагон с разгрузочными люками	Полувагон с глухим кузовом	Хоппер	Цистерна
Уменьшение массы тары, кг	180	150	262	350
Сокращение трудоемкости выполнения сварочно-сборочных работ, %	4,9	4,2	8,7	2,6
Снижение себестоимости, %	3,5	3,2	5,2	1,7

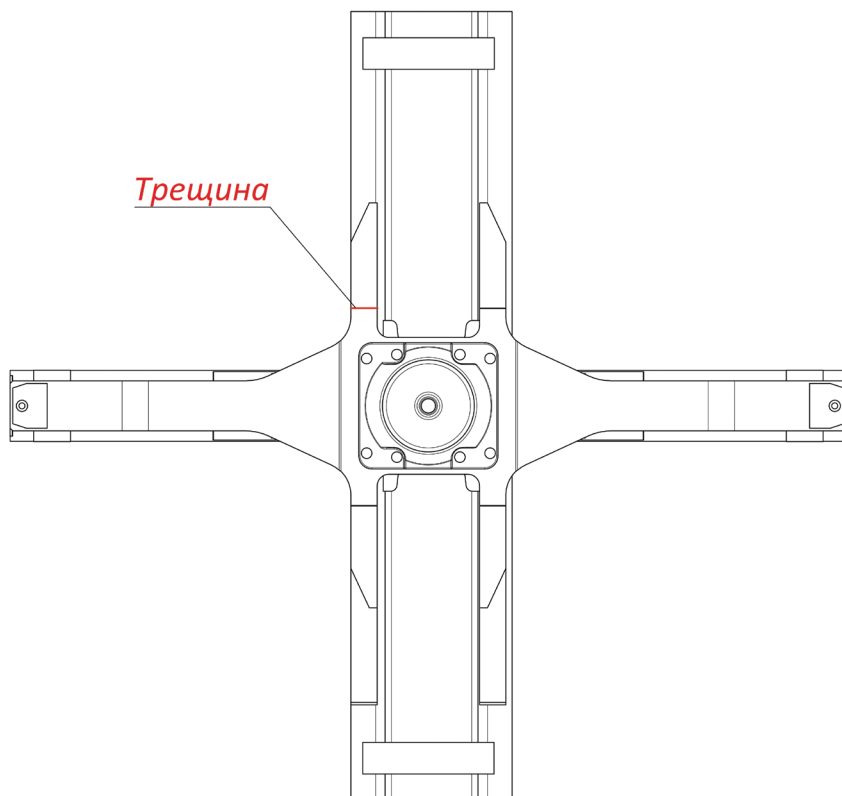


Рис. 10. Место зарождения трещины в узле с хребтовой балкой из зетового профиля

дидась в аналогичных зонах: в месте крепления усиливающей накладки к нижней полке балки (рис. 10).

В дополнение к испытаниям макетов для проведения стационарных прочностных испытаний полувагона с целью подтверждения соответствия показателей прочности и несущей

способности конструкции изготовлен опытный образец полувагона с хребтовой балкой из омегаобразного профиля.

Подобные исследования выполнены при разработке рам новой конструкции вагона-хоппера (рис. 11) и вагона-цистерны (рис. 12). Для узлов и элементов указанных вагонов реализованы анало-

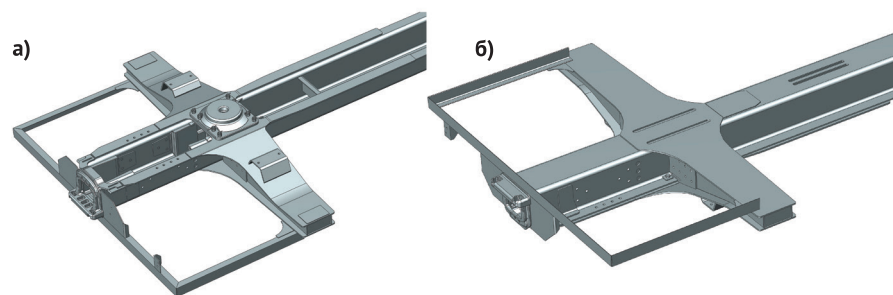


Рис. 11. Рама вагона-хоппера: а) вид снизу; б) вид сверху

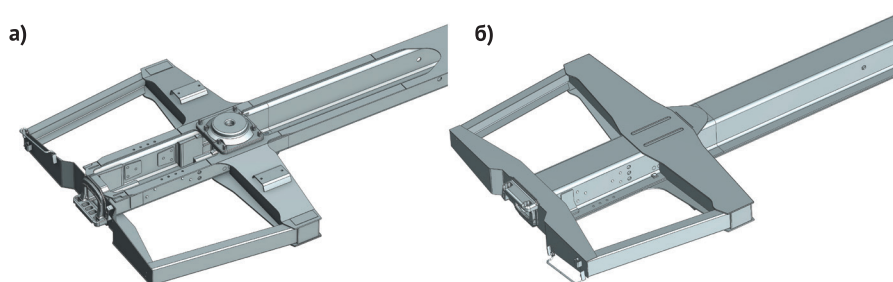


Рис. 12. Рама вагона-цистерны: а) вид снизу; б) вид сверху

гичные технические решения, апробированные на полувагоне.

В результате проведенных исследований, направленных на уменьшение металлоемкости и снижение себестоимости серийных вагонов, достигнуто снижение массы рамы хoppers на 262 кг и сокращение трудоемкости выполнения сварочно-сборочных работ на 8,7 %, снижение массы цистерны на 350 кг, трудоемкости — на 2,6 %. Общая себестоимость изготовления рамы вагона-хоппера при этом снизилась на 5,2 %, а вагона-цистерны — на 1,7 % (табл. 2). Необходимо отметить, что предлагаемые решения позволяют увеличить грузоподъемность вагонов.

Результаты выполненной работы подтвердили целесообразность внедрения гнутых профилей для изготовления несущих элементов кузовов вагонов, например, хребтовых балок. Выработанные решения позволяют уменьшить себестоимость производства вагонов вследствие снижения трудоемкости, материалоемкости, исключения применения специализированных горячекатаных профилей, производимых немногими сталепрокатными заводами. Кроме того, уменьшение массы тары конструкций дает возможность увеличить их грузоподъемность. ■

Литература

1. Шадур Л. А. Развитие отечественного вагонного парка. — М. : Транспорт, 1988. — 279 с.
2. Вагоны: конструкция, теория и расчет / под ред. д. т. н., проф. Л. А. Шадура. — М. : Транспорт, 1980. — 439 с.
3. Харитонов М. И., Панкин В. Н. Грузовые вагоны: учеб. пособие в 2 ч. — Хабаровск : Дальневост. гос. ун-т путей сообщения, 2006. — 134 с.
4. Шевченко П. В., Горбенко А. П. Вагоны промышленного железнодорожного транспорта: учебник для техникумов. Киев : Вища школа, 1980. — 224 с.
5. Патент RU 169001 U 1, опубл. 01.03.2017 г. Хребтовая балка железнодорожного полувагона. Авторы: Савушкин Р. А., Кякк К. В., Денежкин Д. Б. и др.
6. Патент RU 171395 U 1, опубл. 30.05.2017 г. Рама кузова полувагона. Авторы: Савушкин Р. А., Кякк К. В., Денежкин Д. Б. и др.
7. Патент RU 172314 U 1, опубл. 04.07.2017 г. Рама кузова грузового полувагона. Авторы: Савушкин Р. А., Кякк К. В., Денежкин Д. Б. и др.