

Использование высокопрочных сталей в вагоностроении



Ю.П. Бороненко,
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Вагоны и вагонное
хозяйство» Петербургского
университета путей
сообщения Императора
Александра I (ПГУПС)



И.О. Филиппова,
аспирант кафедры
«Вагоны и вагонное
хозяйство» ПГУПС

Снижение массы тары вагона – одна из важнейших задач современного вагоностроения. Меньшая тара позволит повысить грузоподъемность, сократить расходы на закупку материалов, снизить стоимость вагона, сократить расходы на тягу и увеличить полезную погонную нагрузку. Получить нужные результаты можно при использовании новых конструктивных решений и высокопрочных сталей.

Для выявления грузовых вагонов с лучшими технико-экономическими параметрами были проанализированы технические характеристики зарубежных и отечественных моделей вагонов. На железных дорогах США в эксплуатации находятся десятки тысяч грузовых вагонов, у которых осевая нагрузка 32,5 тс, грузоподъемность 110 т, масса тары 19 т, коэффициент тары составляет 0,17 [1, 2]. Таким образом, особенность вагоностроения США состоит в повышении грузоподъемности вагонов за счет применения высокой нагрузки от оси на рельсы, составляющей для большинства вагонов 28,5–33 тс, что позволяет строить четырехосные вагоны грузоподъемностью до 110 т.

Вагоностроение в странах Западной Европы производит в основном четырехосные вагоны с осевой нагрузкой до 22,5 тс. По коэффициенту тары они существенно уступают вагонам колеи 1520 мм.

В России современное вагоностроение ориентировано на повышение

пропускной и провозной способности железных дорог за счет увеличения нагрузки от колеса на рельс до 25 тс и более, применения габарита Тпр или Тц, увеличения конструкторской скорости до 140 км/ч [3]. Коэффициент тары отечественных грузовых вагонов в настоящее время составляет от 0,42 до 0,32, поэтому при перевозке одной тонны груза по железным дорогам России одновременно перевозится практически вдвое больше металла [1, 4].

По результатам обзора были выбраны зарубежные и отечественные модели вагонов с минимальными значениями коэффициента тары (табл. 1).

Были выделены вагоны с низким коэффициентом тары и с увеличенной грузоподъемностью. Вагоны США в большинстве случаев имеют коэффициент тары ниже, чем отечественные вагоны. Особое внимание следует уделить вагону модели BethGonAeroflo (рис. 1) производства Freight Car America, выполненному из высокопрочного алюминиевого сплава. Коэффициент тары этого вагона составляет 0,17.

Таблица 1. Характеристика грузовых вагонов

Модель вагона, страна, производитель	Грузоподъемность, т	Масса тары, т	Объем кузова, м ³	Осевая нагрузка, т/ось	Коэффициент тары
12-9833, Россия, ТВСЗ	71,5	22,5	92	23,5	0,31
12-9828, Россия, РВЗ	83	24	98	27,0	0,29
12-197, Россия, УВЗ	74,5	25,5	92	25,5	0,34
Greenbrier, США	98,7	31,1	86,2	32,5	0,31
Transvagon AD, Болгария	64	26	72	22,5	0,41
37`MILL GONDOLA, США, American Railcar Industries	105	24,7	70,8	32	0,24
GONDOLA-MILL, Канада, National Steel Car	116	24,3	76	35	0,21
Hybrid Gon, США, FreightCar America	108,1	21,79	115	32,5	0,20
BethGonAeroflo, FreightCar America	110	18,9	110	32	0,17



Рис. 1. Вагон модели BethGonAeroFlo

Использование сталей в конструкциях вагонов нового поколения

Железнодорожный транспорт относится к металлоемким отраслям, это крупнейший потребитель металлопродукции. Качество конструкционных материалов существенно влияет на надежность, долговечность, массу тары и на другие технико-экономические характеристики вагонов [1].

В работе [2] показана экономическая эффективность от внедрения новых материалов: высокопрочных и коррозионно-стойких сталей, алюминиевых сплавов, при использовании которых снижается масса тары грузовых вагонов. За рубежом высокопрочные материалы в конструкции грузовых вагонов внедрены около 15 лет назад. В России стали с повышенной прочностью (до 390 МПа) в элементах грузовых вагонов начали

использовать при производстве вагонов нового поколения. Основные усиленные узлы – хребтовая балка рамы вагона, листы шкворневых и промежуточных балок рамы полувагонов, вертикальные стойки кузова вагона, листы обечайки и днища котлов вагонов-цистерн, обшивка кузова вагона [1]. Такие решения позволяют уменьшить массу тары, однако снижение коэффициента тары у новых вагонов незначительно.

Характеристики сталей с высоким классом прочности, производимых в России и за рубежом

Высокопрочными (машиностроительными, конструкционными) принято считать такие стали, у которых предел прочности после термической обработки выше 1300 МПа. Основными легирующими элементами в высокопрочных сталях являются хром, никель,

молибден, кремний. Как известно, с ростом процентного содержания углерода и названных элементов ухудшается свариваемость стали. В работах [1, 6] к недостаткам таких сталей относят высокую хрупкость при низких температурах, низкую пластичность, недостаточную усталостную прочность.

На основании обзора сталей, применяемых в машиностроении в РФ и за рубежом, были выделены марки сталей (табл. 2), удовлетворяющие требованиям [3].

Проанализировав характеристики этих сталей и опыт их использования в машиностроении российскими и зарубежными производителями, можно сделать следующие выводы:

1) отечественные марки стали не уступают, а порой и превосходят зарубежные аналоги по механическим характеристикам и вязкости разрушения при минусовой температуре;

2) сталями с высокой прочностью, рекомендуемыми для изготовления деталей грузовых вагонов, могут быть стали с пределом текучести 800–900 МПа, например 30ХГСА и Optim 960 QC.

Сталь 30ХГСА изначально предназначалась для авиастроения, но благодаря своим отличительным характеристикам нашла более широкое применение. Закалка этой стали проводится в температурном диапазоне 550–650 °С. Термообработка позволяет повысить прочность материала (до 2800 МПа) и пластичность. Свариваемость хорошая, однако для качественного шва нужно предварительно подогреть металл и медленно охладить его. Сталь отличается невысокой стоимостью, так как легирующие компоненты не дефицитны.

Сталь Optim 960 QC широко используется в Финляндии. По описаниям изготовителя сталь этой марки легко сваривается всеми распространенными

Таблица 2. Марки высокопрочных сталей, применяемые в машиностроении в РФ и за рубежом

Марка стали, страна- производитель	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Область применения
09Г2С, Россия	345	21	Сварные конструкции
16Г2АФ, Россия	440	19	Сварные узлы вагонов
30ХГСА, Россия	835	10	Ответственные конструкции
Optim 960QC, Финляндия	960	7	Сварные узлы машин
AR 400, Финляндия	1000	10	»
AR 500, Финляндия	1250	8	»
35ХГСА, Россия	1275	9	Ответственные конструкции
35ХГСН2А, Россия	1375	9	»
30Х9Н8М4Г2С2, 25Н25М4Г1, Россия	1400	50	Высоконагруженные детали

ми способами, как правило, для тонких листов подогрев не требуется. Свойства стали приведены в [5].

Цены на эти стали сравнимы с ценами на стали класса прочности 300–400 МПа [2]. Почему же до сих пор нет новых вагонов с малой массой тары, изготовленных из высокопрочных сталей? Можно ли снизить массу тары вагона, используя высокопрочные стали и проектируя новый вагон согласно действующим нормам и правилам? Попробуем ответить на эти вопросы.

Оценка снижения массы конструкций при использовании сталей повышенной прочности

Для оценки возможности снижения металлоемкости изделий из высокопрочных сталей были выполнены расчеты на прочность двутавровой балки (рис. 2), изготовленной из трех марок стали.

Нагрузка P на балку определялась из условий прочности

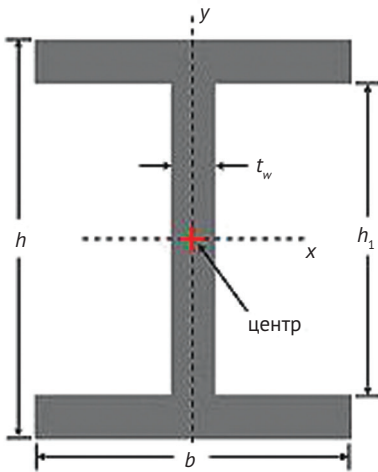


Рис. 2. Двутавровая балка: b – ширина полки по оси x ; h – высота двутавровой балки по оси y ; t_w – толщина стенок; h_1 – расстояние между двумя полками

$$P = \frac{[\sigma] \cdot 4J_x}{2L_1 \cdot h}$$

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение; J_x – момент инерции; L_1 – расстояние между опорами; h – высота балки.

Высота балки 400 мм, длина 1000 мм, толщина листов балки принималась постоянной, но выбиралась исходя из требования по обеспечению различных условий прочности. В качестве эталона принималась балка, изготовленная из стали 09Г2С с моментом инерции $19\,786\text{ см}^4$.

Таблица 3. Характеристика цельнокатаной балки из условия неперевышения напряжений предела текучести

Параметр	Марка стали		
	09Г2С	30ХГСА	Optim 960 QC
Предел текучести σ_t , МПа	345	835	960
Толщина стенок t_w , мм	10	3,9	3,2
Масса балки, кг	60,8	24,1	20,0

При статической нагрузке $P_{ст} = 1365\text{ кН}$ напряжения в этой балке достигают предела текучести.

На первом этапе расчетов были определены такие значения параметров балок, изготовленных из сталей повышенной прочности, чтобы максимальные напряжения в них равнялись пределу текучести.

Характеристики балок, изготовленных из различных сталей, представлены в табл. 3. Видно, что при действии статической нагрузки масса балки из стали Optim 960 QC уменьшается почти в три раза.

На втором этапе расчетов были определены значения параметров балки из условия равенства максимальных напряжений пределу выносливости. В справочной литературе нет данных о пределах выносливости σ_{-1} гладких стандартных образцов из высокопрочной стали, поэтому значения напряжения σ_{-1} определялись двумя способами: по формулам, рекомендованным «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС России колеи 1520 мм (несамоходных)» [7],

$$\sigma_{-1} \approx 0,50\sigma_b,$$

и справочником «Расчет на прочность деталей машин» [8]:

$$\sigma_{-1} \approx (0,55 - 0,001\sigma_b)\sigma_b.$$

Предел выносливости балки определялся по формуле

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{K_\sigma},$$

где $\overline{K_\sigma} = 1,5$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости балки к пределу выносливости гладкого образца.

Величина динамической нагрузки принималась из условия равенства максимального напряжения пределу выносливости балки, изготовленной из стали 09Г2С, а расчетное количество циклов принималось $1 \cdot 10^7$. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Массы балок из высокопрочной стали также оказались существенно меньше, чем балок из стали 09Г2С.

На третьем этапе был сделан расчет на усталость балки с двухсторонним прямым стыковым сварным швом в центральном сечении. Пределы выносливости определялись различными способами: по «Нормам...» [7], по ГОСТ 33211 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [9] и по «Рекомендациям для расчета на усталость сварных соединений и компонентов» международного института сварки [10]. При расчете по «Нормам...» $\overline{K_\sigma}$ принимался равным 2,4 [7, с. 60, табл. 3.2] и определялось напряжение σ_{-1}

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{K_\sigma}.$$

При расчете по ГОСТ 33211 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [9]

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_m}}{K_\sigma},$$

где $\overline{\sigma_m} = 47\text{ МПа}$ для сталей, $\overline{K_\sigma} = 2$ [9, с. 40, табл. 10], $\overline{\sigma_{a,N}} = 23,5\text{ МПа}$.

При расчете по «Рекомендациям...» [10] класс усталости данного сварного соединения $FAT = 80\text{ МПа}$ при базе $N_1 = 2 \cdot 10^6$ циклов с учетом того, что FAT – размах напряжений. Предел выносливости данного сварного соединения на базе $N_1 = 10^7$ [10, с. 47, табл. 3.2-1] также составит

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot (FAT)^3}{10^7}} = 23,5\text{ МПа}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 5.

Масса балки из высокопрочных сталей при расчетах по «Нормам...» [7] оказалась меньше почти в два раза. Масса балки при расчете по ГОСТ 33211 «Вагоны грузовые. Технические требования к прочности и динамическим качествам» [9] и «Рекомендациям для расчета на усталость сварных соединений и

Таблица 4. Характеристики балки из условия обеспечения усталостной прочности

Параметр	Марка стали		
	09Г2С	Optim 960QC	30ХГСА
Предел выносливости, МПа $\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{0,5\sigma_B}{1,5}$	150	333	360
Толщина стенки, мм	10	4,3	3,9
Масса балки, кг	60,8	26,5	24,1
Предел выносливости, МПа $\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{(0,5 - 0,001\sigma_B)\sigma_B}{1,5}$	151	299	317
Толщина стенок, мм	10	4,8	4,5
Масса балки, кг	60,8	29,6	27,8

Таблица 5. Характеристики балки из условия неперевышения напряжений предела выносливости сварного шва

Параметр	Марка стали		
	09Г2С	Optim 960QC	30ХГСА
Предел выносливости, МПа «Нормам...» [7]	94	175	189
Толщина стенки, мм	10	4,7	5,1
Масса балки, кг	60,8	28,9	31,4
Предел выносливости, МПа по ГОСТ 33211 «Вагоны грузовые. Технические требования к прочности и динамическим качествам» [9] и «Рекомендациям для расчета на усталость сварных соединений и компонентов» международного института сварки [10]	23,5	23,5	23,5
Толщина стенок, мм	57,5	57,5	57,5
Масса балки, кг	~300	~300	~300

компонентов» международного института сварки» [10] увеличилась для всех образцов.

Подводя итог, можно утверждать, что с учетом низких допустимых напряжений для сварных соединений, рекомендуемых новым ГОСТом [9], невозможно снизить массу тары вагонов существующей конструкции, где сварка используется как основной элемент соединения.

Насколько справедливы эти ограничения, может дать ответ только комплекс исследований усталостной прочности опытных образцов сварных соединений из высокопрочных сталей. Кроме того, необходимо рассмотреть способы повышения усталостной прочности и возможности перехода на другие виды соединений.

Таким образом, вагоны колеи 1520 мм существенно уступают по массе тары вагонам, произведенным в Северной Америке с применением высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов. Действующие «Нормы...» [7] и особенно ГОСТ 33211 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [9] назначают низкие пределы выносливости высокопрочных сталей. При использовании указанных величин для расчета вагонов со сварными соединениями снижение массы тары

вагонов незначительно. В то же время за рубежом эксплуатируются вагоны с малой массой тары. Чтобы обеспечить возможность создания вагонов с облегченной тарой, необходимо:

- 1) провести комплекс испытаний типовых сварных соединений из высокопрочных сталей на выносливость и получить статически надежные механические свойства сварных соединений, что позволит оценить реальную возможность снижения металлоемкости вагонных конструкций;
- 2) выбрать способы повышения усталостной прочности сварных соединений;
- 3) разработать новую методику расчета соединений высокопрочных сталей. ■

Литература

1. Конохов А.Д., Ефимов В.П. Демин К.П. Высокопрочные стали и сплавы для кузовов грузовых вагонов // Тяжелое машиностроение. 2006. № 12. С. 31–34.
2. Битюцкий А.А. Пути повышения эффективности грузовых вагонов, выпускаемых российскими вагоностроительными предприятиями // Тяжелое машиностроение. 2008. № 2. С. 29–33.
3. Общие технические требования к грузовым вагонам нового поколения. М.: МПС РФ, 2001. 25 с.

4. Бороненко Ю.П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения // Транспорт РФ. 2013. № 5(48). С. 68–73.
5. Сильвеннойнен С. Раутаруукки металлопродукция: справ. проектировщика. Keuruu: Otava Kirjaino Oy, 2000. 317 с.
6. Хилов И.А. Обоснование возможности применения высокопрочных марок сталей в конструкции вагонов, эксплуатируемых на российских железных дорогах / Тяжелое машиностроение. 2010. № 7. С. 36–39.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС России колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
8. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справ. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
9. ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам». Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
10. Хоббачер А. Международный институт сварки (IIW): рекомендации для расчета на усталость сварных соединений и компонентов // Бюл. WRC 520.