



РАСЧЕТ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Л. М. ЛОБАНОВ, О. В. МАХНЕНКО, Г. Ю. САПРЫКИНА, А. Д. ПУСТОВОЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Статистика аварийности на железных дорогах Украины и России свидетельствует об увеличении в последние годы случаев, связанных с разрушением литых несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузового вагона. Анализ эксплуатационной надежности литых конструкций боковой рамы и надрессорной балки тележки типа 18-100 показал, что основной причиной отказа является появление усталостных трещин. Целесообразным является поиск альтернативы относительно возможности использования технологии сварки при изготовлении указанных деталей из листового проката с целью повышения их надежности и живучести. Показано, что существующие Нормы на проектирование сварных соединений и узлов вагонов железных дорог существенно превышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам по сравнению с Рекомендациями Международного института сварки. Этот недостаток характерен для многих действующих в России и Украине нормативных документов, регламентирующих расчетное определение сопротивления усталости сварных соединений и узлов, что приводит к негативным результатам проектирования по требуемой долговечности сварных элементов. При разработке надежных и технологичных сварных элементов тележки грузовых вагонов необходимо использовать последние достижения в области усталостной прочности сварных соединений. Библиогр. 13, табл. 4.

Ключевые слова: сварные конструкции, сварное соединение, грузовой вагон, трехэлементная тележка, боковая рама, разрушение рамы, сопротивление усталости, амплитуда напряжений

Статистика аварийности на железных дорогах Украины и России свидетельствует об увеличении в последние годы случаев, связанных с разрушением литых несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузового вагона. Анализ эксплуатационной надежности литых конструкций боковой рамы и надрессорной балки тележки типа 18-100 и ее модификаций показал, что основной причиной отказа является появление усталостных трещин [1, 2]. Задача повышения сопротивления усталости и живучести несущих элементов тележки является крайне актуальной.

Перспективным является изготовление указанных деталей из листового проката с использованием технологии сварки с целью повышения их эксплуатационных характеристик надежности при переменных нагрузках [3].

В Западной Европе широко используются сварные конструкции тележек грузовых вагонов. Известны попытки по созданию в Украине и России конструкций цельносварных несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов, взаимозаменяемых с литыми конструкциями [4–8]. Однако ни одна из разработанных сварных конструкций боковой рамы и надрессорной балки не применяется сегодня при регулярных грузоперевозках, поскольку их конструкции в большинстве случаев были плохо оптимизированы с точки зрения сопротивления усталости сварных соединений.

При создании конкурентоспособных сварных конструкций несущих элементов, взаимозаменяемых с литыми элементами тележки типа 18-100, необходимо обеспечить надежность сварного варианта несущих элементов за счет повышения сопротивления усталости и живучести по сравнению с литой конструкцией. Расчет сопротивления усталости разрабатываемых цельносварных конструкций элементов тележки грузового вагона регламентируется действующими в настоящее время на территории Украины и России Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [9] (далее Нормами) по коэффициентам запаса сопротивления усталости для различных оценочных зон (основного металла и сварных швов) с учетом распределения коэффициента вертикальной динамики по диапазонам скоростей эксплуатации (спектр нагрузки).

К сожалению, действующие Нормы на проектирование сварных соединений и узлов вагонов железных дорог существенно превышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам, что обуславливает негативные результаты проектирования по требуемой долговечности.

Значения этих нагрузок зависят от скорости движения вагона, состояния пути и т. п., т. е. это целый спектр циклических нагрузок, элементы которого имеют различную вероятность появления

Таблица 1. Значения $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$ для некоторых типичных элементов несущих конструкций вагонов в соответствии с Нормами [9]

Характеристика элемента и расчетной зоны	Значение $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$
Стандартный образец с полированной поверхностью по ГОСТ 25.502–79	1,0
Полоса прокатная или литая с сечением 20 см ² без концентраторов напряжений по основному металлу	1,3...1,5
Балки из фасонного проката (двутавр, швеллер, зет, уголок) и штампованные из листового проката по основному металлу полок (вдали от концентраторов напряжений)	1,3...1,5
Балки коробчатые, сваренные из фасонного проката и штамповок продольными стыковыми швами по верхним и нижним полкам без поперечных ребер жесткости и диафрагм, по сварному шву	1,4...1,6
Балки коробчатые, сваренные из фасонного проката продольными угловыми швами без поперечных ребер жесткости и диафрагм, по сварному шву	1,5...1,7
Балки из фасонного проката и штамповок, пояса коробчатых балок из листового проката, сваренные двусторонними прямыми поперечными стыковыми швами, в зоне сварного шва	2,0...2,4
То же, двусторонними косыми под 45° швами	1,8...2,2
То же, двусторонними прямыми, обработанными заподлицо с поверхностью основного металла швами	1,5...1,7
То же, односторонними прямыми швами (с непроваром корня шва или при отсутствии подварки)	4,0...4,8

во времени эксплуатации вагона. Этот вопрос достаточно хорошо изучен и в Нормах имеются соответствующие рекомендации, позволяющие количественно определить силовые характеристики циклического нагружения в эксплуатационных условиях. Недостатком Норм являются рекомендации относительно значений сопротивления несущих сварных соединений циклическим нагрузкам.

В Нормах предел выносливости $\sigma_{a,N}$ (по амплитуде) при условии, что $\sigma_{a,N}$ соответствует вероятности $P = 0,95$ неразрушения, для сварных рам и балок из листового и фасонного проката при полуавтоматической и ручной сварке:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(\bar{K}_\sigma)_\alpha} (1 - z_p v_\sigma), \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ — среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала детали (по ГОСТ 25.502–79) при симметричном цикле изгиба ($R = -1,0$) на базе N циклов; $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$ — среднее значение коэффициента снижения предела выносливости детали по отношению к пределу выносливости стандартного образца; z_p — квантиль распределения $\sigma_{a,N}$ как случайной величины; v_σ — коэффициент вариации предела выносливости при условии, что $\sigma_{a,N}$ соответствует вероятности $P = 0,95$ неразрушения ($(1 - z_p v_\sigma) = 0,88$).

В табл. 1 приведены данные из Норм [9] относительно величин $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$ для типичных элементов несущих конструкций вагонов.

Из зависимости (1) следует, что, поскольку $\bar{\sigma}_{-1}(N)$ зависит от прочности основного металла, увеличиваясь с ростом σ_b , то у пользователей Норм складывается мнение, что повышение прочности σ_b конструкционной стали способствует, согласно (1), увеличению $\sigma_{a,N}$. Между тем достаточно известным фактом, четко сформулированным в Рекомендациях Международного института свар-

ки [10] на основе обработки многочисленных экспериментальных данных, является положение, что для необработанных сварных соединений конструкционных сталей ферритного (перлитного) классов с пределом прочности σ_b от 400 до 900 МПа значение $\sigma_{a,N}$ для достаточно представительной выборки испытаний не зависит от величины σ_b , т. е. для сварной рамы и балки из низкоуглеродистой стали с пределом прочности $\sigma_b = 400$ МПа и высокопрочной низколегированной стали с $\sigma_b = 900$ МПа сопротивление малоциклового усталости сварных соединений будет примерно одинаковым.

Существенные замечания имеются и относительно рекомендуемых в Нормах значений коэффициентов $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$ для сварных соединений. Так, для продольных сварных соединений балок, изготовленных из листового проката, рекомендуют (см. табл. 1) значения $(\bar{K}_\sigma)_\alpha$ на уровне 1,5...1,7, т. е. для стали с пределом прочности $\sigma_b = 450$ МПа и $\bar{\sigma}_{-1} = 225$ МПа на базе 10^7 циклов величина $\sigma_{a,N}$ по (1) для сварных соединений равна

$$\sigma_{a,N} = \frac{225}{1,7} \cdot 0,88 = 117 \text{ МПа.}$$

По Рекомендациям [10] предел выносливости для сварных соединений (по амплитуде) на базе $2 \cdot 10^7$ циклов:

$$\sigma_{a,N} = 0,5 \text{FAT}(R)f(N), \quad (2)$$

где FAT — предел выносливости (по размаху) на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при симметричном цикле, определяется классом сварного соединения (табл. 2); $f(R)$ — функция коэффициента асимметрии цикла нагружения R и уровня остаточных напряжений. При $R = -1,0$ значение $f(R)$ находится в пределах $f(R) = 1,6$ при уровне остаточных напряжений менее 0,2 и $f(R) = 1,0$ при более высоких остаточных напряжениях; $f(N)$ — параметр, учитывающий ограниченную усталость. В диапазоне $10^4 < N < 10^8$ циклов $f(N)$ определяется зависимостью



Таблица 2. Фрагменты значений FAT для различных сварных соединений из Рекомендаций МИС [10]

Но- мер	Эскиз детали	Описание	FAT (для стали)
300	Продольно нагруженные угловые (тавровые) сварные соединения		
321		Продольные сплошные швы с К-образной разделкой, автоматическая сварка без остановок, неразрушающий контроль (напряжения в полке)	125
322		Продольные сплошные швы без К-образной разделки кромок стенки, автоматическая сварка без остановок, неразрушающий контроль (напряжения в полке)	100
323		Продольные сплошные угловые швы, ручная сварка с К-образной разделкой или без нее (напряжения в полке)	90
200	Стыковые соединения (поперечная нагрузка)		
Двусторонние соединения			
211		Поперечно нагруженный шов, X- либо V-образная подготовка кромок, усиление снято. 100%-ый неразрушающий контроль	112
212		Поперечный шов, сварка в цеховых условиях в нижнем положении. Неразрушающий контроль, усиление шва < 0,1 толщины	90
213		Поперечный шов, не подходящий под условия № 212. Неразрушающий контроль. Примечание: сварной шов с углом усиления шва ≤ 50°, сварные швы с углом усиления шва > 50°.	80
Односторонние соединения			
214		Поперечный шов с неплавящейся подкладкой, корневая трещина	80
215		Поперечный шов на остающейся подкладке, закрепленной на расстоянии > 10 мм от края пластины < 10 мм от края пластины	71 63
216		Поперечные стыковые сварные швы, сварка с одной стороны, без подложки, полное проплавление Корень контролируется неразрушающими методами без разрушающего контроля	71 36

$$f(N) = \left(\frac{C}{N}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3)$$

где N — долговечность сварного соединения; $C = 2 \cdot 10^6$, $m = 3$ при $10^4 < N < 10^7$ циклов, при $N > 10^7$ циклов можно принять, что амплитуда не меняется.

Таким образом, для продольных сварных соединений балок при FAT = 90...125 МПа, $f(R)=1,0$ и $f(N) = 0,585$ ($N = 10^7$ циклов) $\sigma_{a,N}$ по работе [10] не превышает $\sigma_{a,N} = 26$ МПа.

Соответственно допускаемые амплитуды $[\sigma_{a,N}] = \sigma_{a,N} / n$, где n — коэффициент безопасности. По Нормам значения n принимаются для элементов кузовов вагонов всех типов в пределах $n = 1,3 \dots 1,8$ в зависимости от степени надежности данных по $\sigma_{a,N}$, а для новых конструкций рекомендуется назначать $n = 2$. По Рекомендациям МИС значение коэффициента безопасности для ответственных конструкций принимается в пределах $n = 1,15 \dots 1,4$. При таком допущении получим для рассматриваемых продольных сварных соединений соответствующие допускаемые амплитуды

$$[\sigma_{a,N}] = 117/2 = 58,5 \text{ МПа и}$$

$$[\sigma_{a,N}] = \frac{26}{1,15 \dots 1,4} = 24 \dots 19 \text{ МПа.}$$

Видно, что допускаемые значения амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов для продольных сварных соединений балок по Нормам на 145...210 % выше таковых по Рекомендациям МИС.

Аналогично продольным сварным соединениям выполнено сравнение допускаемых значений $[\sigma_{a,N}]$ для односторонних и двусторонних стыковых сварных швов, расположенных поперечно по отношению к действию номинальных напряжений. Результаты сравнения, представленные в табл. 3, подтверждают, что действующие Нормы существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам. Такие примеры показывают, что спроектированные в рамках Норм сварные несущие конструкции железнодорожных вагонов могут не иметь достаточную долговечность. Возможно, это одна из причин, почему до сих пор не было разработано

Таблица 3. Сравнение допускаемых значений амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов для различных сварных соединений по Нормам [9] И ГСН [11], а также по Рекомендациям МИС для конструкций из стали с пределом прочности $\sigma_b = 450$ МПа

Тип сварного соединения	Нормы [9] (при $n = 2$)		Рекомендации МИС [10]			ГСН [11] (при $n = 2$)
	$(\bar{K}_\sigma)_\alpha$	$[\sigma_{a,N}]$, МПа	FAT, МПа	n	$[\sigma_{a,N}]$, МПа	$[\sigma_{a,N}]$, МПа
Продольное угловое	1,5...1,7	58...66	90...125	1,15 1,40	26...32 19...23	23
Поперечное стыковое двустороннее	2,0...2,4	41...50	80...112	1,15 1,40	23...28 17...20	33
Поперечное стыковое одностороннее	4,0...4,8	21...25	36...80	1,15 1,40	17...20 7,5...9,0	16

надежных и технологичных конструкций цельносварных несущих элементов трехэлементной тележки грузового вагона, способных составить конкуренцию литым деталям.

Надо отметить, что имеется положительный опыт применения Рекомендаций МИС при разработке сварных конструкций тележек грузовых вагонов. В 2002 г. ООО «ГСКБВ»(г. Мариуполь) совместно с ГУП НВЦ «Вагоны» (г. Санкт-Петербург) разработали сварную конструкцию трехэлементной тележки модели 18-1711 с осевой нагрузкой 25 тс [12]. Первоначальные опытные образцы надрессорных балок не прошли стендовых испытаний на усталость. С помощью специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины цельносварная конструкция надрессорной балки была усовершенствована с позиций повышения сопротивления усталости ее сварных соединений [13]. При последующем проведении сокращенных ускоренных испытаний двух опытных образцов надрессорной балки на циклическую нагрузку в первой балке макротрещину длиной 30 мм обнаружили при $2,745 \cdot 10^6$ циклах нагружения, во второй балке после $6 \cdot 10^6$ циклов нагружений усталостная макротрещина обнаружена не была и испытания прекратили. Таким образом, проведенные испытания показали, что разработанная сварная конструкция надрессорной балки обеспечивает требуемую долговечность, по прочностным и ве-

совым показателям она не уступает литой и может быть рекомендована для проведения полного цикла испытаний.

Одним из действующих в Украине нормативных документов, регламентирующих расчет на сопротивление усталости элементов стальных конструкций, в том числе сварных, являются Государственные строительные нормы (ГСН) [11]. Согласно этому документу, при расчете суммарной повреждаемости стальных конструкций граничное допустимое количество циклов N_i рассчитывается следующим образом:

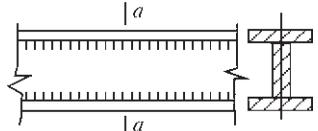
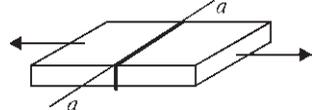
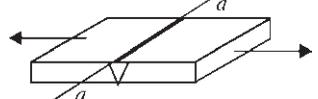
$$N_i = \frac{A_\rho \cdot 10^3}{\ln \left[\frac{2\sigma_{a,i}}{(1-\rho_i)R_{\rho_i}} \right]} - B_\rho \cdot 10^3, \quad (4)$$

где $\sigma_{a,i}$ — амплитудные напряжения цикла; ρ — асимметрия цикла; R_{ρ_i} — расчетный предел выносливости рассчитываемого сечения, определяется по формуле

$$R_\rho = \frac{2\sigma_{-1}}{2 - D_n(1+\rho)} \left(1 - 1,63 \frac{S_{\sigma_{-1}}}{\sigma_{-1}} \right), \quad (5)$$

где значения параметров σ_{-1} , D_n , $S_{\sigma_{-1}}$ принимаются по таблицам [11]; A_ρ и B_ρ — параметры, которые заданы таблично в документе [11]. При этом по конструктивно-технологическим признакам основной металл, сварные соединения, соединения на высокопрочных болтах элементов и узлов конструк-

Таблица 4. Некоторые группы элементов и соединений при расчете на выносливость [11]

Схема элемента и положение рассчитываемого сечения	Характеристика элемента	Группа элемента
	Сварные сечения двутаврового, таврового и других типов, сваренные непрерывными продольными поясными швами при действии усилия вдоль оси шва	3а и 3б
	Стыковой необработанный шов при действии нагружения, приложенного перпендикулярно линии шва; при этом элементы, которые стыкуются, одинаковой ширины и толщины	2
	Стыковой шов, выполненный на подкладном листе, при действии нагружения, приложенного перпендикулярно линии шва	4а и 4б



ций с учетом действия усилий относительно расчетного сечения поделены на группы. В табл. 4 показаны группы элементов разных соединений [11].

Таким образом, согласно [11] для продольных угловых сварных соединений балок при асимметрии цикла $\rho = -1$ и коэффициентах $\sigma_{-1} = 62$ МПа, $S_{\sigma-1} = 12$ МПа, $D_n = 0,89$ из выражения (5) предел выносливости на базе 10^7 циклов будет равен 42 МПа.

Допускаемые амплитуды номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ равны амплитуде напряжений цикла $\sigma_{a,i}$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов и коэффициенте асимметрии цикла $\rho = -1$ и могут быть определены из зависимости (4):

$$\sigma_{a,i} = \exp\left(\frac{A_p \cdot 10^3}{10^7 + B_p \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{(1 - \rho_i) \cdot R_p}{2} =$$

$$= \exp\left(\frac{525 \cdot 10^3}{10^7 + 470 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{(1 + 1) \cdot 42}{2} = 45 \text{ (МПа)}.$$

Для более корректного расчета на основе ГСН [11] допускаемых амплитуд номинальных напряжений для боковых рам и надрессорных балок тележек железнодорожных вагонов необходимо полученные по формуле (4) значения поделить на коэффициент запаса $n = 2$ для таких ответственных конструкций. В табл. 3 добавлены значения допустимых амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ согласно [11] для различных сварных соединений без послесварочной термообработки в сравнении с данными по действующим Нормам [9] и Рекомендациям МИС [10]. Видно, что расчеты на сопротивление усталости сварных соединений по ГСН [11] дают более консервативные результаты по сравнению с Нормами [9], которые существенно превышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам, что может приводить к ошибкам при проектировании новых сварных конструкций несущих элементов тележек грузовых вагонов.

Выводы

1. Разработка цельносварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона, взаимозаменяемых с литыми элементами тележки типа 18-100, может обеспечить повышение их надежности и долговечности, уменьшение массы, точность базового размера боковой рамы в пределах одного типоразмера. Внедрение производства элементов тележки по технологии сварки является не

столь затратным по сравнению с технологией литья, что может создать условия насыщения рынка качественными элементами грузовой тележки.

2. Спроектированные в рамках действующих Норм сварные конструкции несущих элементов тележек грузовых железнодорожных вагонов могут не иметь достаточную долговечность, что подтверждает практика.

3. При разработке надежных и технологичных сварных элементов тележки грузовых вагонов необходимо использовать последние достижения в области усталостной прочности сварных соединений. Действующие Нормы расчета и проектирования железнодорожных вагонов в части сварных соединений этих конструкций требуют радикальной переработки с учетом накопленной информации Международным институтом сварки (Рекомендации МИС).

1. Пранов В. А. Повышение усталостной долговечности боковой рамы тележки грузового вагона: Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщ., 2012. – 115 с.
2. Соколов А. М. О формировании комплексной программы научно-исследовательских работ по проблеме изломов боковых рам тележек грузовых вагонов // Бюл. объединенного Ученого совета ОАО «РЖД». – 2012. – № 3. – С. 3–11.
3. Перспективы создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона / О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, И. В. Мирзов, А. Д. Пустовой // Автомат. сварка. – 2014. – № 3. – С. 36–42.
4. Пат. 2275308 RU. Тележка двухосная для грузовых вагонов / В. А. Волков, А. Д. Чепурной, В. М. Бубнов и др. – Оpubл. 27.04.2004; Бюл. № 12.
5. Свидетельство на полезную модель RU №37683 U1. Боковая рама тележки грузового вагона / В. С. Хоминич, М. А. Тройников, В. П. Богданов. – Оpubл. 10.05.2004.
6. Пат. 2246416 C2 RU, МПК7: B61F5. Двухосная тележка грузового вагона / С. Ю. Дейнеко, В. И. Приходько, Н. А. Бондарь и др. – Оpubл. 20.06.2004.
7. <http://www.nvc-vagon.ru>
8. Пат. 2373091 C2 RU, МПК7: B16F5. Тележка железнодорожного вагона, боковая рама и надрессорная балка тележки железнодорожного вагона / А. А. Шаралов, Б. Л. Головизнин, Н. А. Малых и др. – Заявл. 04.10.2007; Оpubл. 20.11.2009.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1995. – 317 с.
10. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. – [2006]. – 147 p. – (Intern. Inst. of Welding; Doc XIII – 1965r14–03/XV – 1127r14–03).
11. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.
12. Пат. 2275308 RU, МПК7: B61F5/38; B61F5/26; B61F5/12; B61F3/02 / В. А. Волков, А. Д. Чепурной, В. М. Бубнов и др. Тележка двухосная для грузовых вагонов. – Оpubл. 27.04.2004; Бюл. № 12.
13. Проект сварной надрессорной балки тележек грузовых вагонов / В. И. Махненко, Э. Ф. Гарф, С. Т. Римский и др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 4. – С. 3–10.

Поступила в редакцию 02.06.2014