

УДК 629.4.02

А.В. ПУТЯТО, д-р техн. наук; В.В. БЕЛОГУБ; И.И. АРХУТИК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЛА И РАМЫ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ОЦЕНКОЙ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Предложены технические решения по модернизации конструкции котла и рамы вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов модели 15-1443 после длительной эксплуатации. Выполнен комплекс расчетов на прочность металлоконструкции вагона с учетом фактического состояния ее элементов (коррозионного износа), а также произведена оценка остаточного ресурса несущих конструкций после модернизации. Установлено снижение уровня напряжений в наиболее нагруженных областях конструкций, а также приведены данные по увеличению коэффициента запаса усталостной прочности в результате проведения работ по модернизации.

Ключевые слова: вагон-цистерна, модернизация, прочность, остаточный ресурс

Введение. В работе [1] для повышения несущей способности котла вагона-цистерны в рамках выполнения капитального ремонта с продлением срока службы (КРП) вагона, предложена установка кольцевых незамкнутых подкрепляющих шпангоутов, и определены рациональные параметры, определяющие места их расположения, геометрические характеристики их поперечных сечений, а также линейные размеры подкреплений по критерию максимального запаса потери устойчивости. Из многолетнего опыта технического диагностирования металлоконструкций наливного подвижного состава после длительной эксплуатации также известно, что к наиболее проблемным зонам относится зона сочленения хребтовой и шкворневой балок. Следует отметить, что при продлении срока службы вагона в рамках капитального и деповского ремонта, металлоконструкция вагона подвергается тщательному техническому диагностированию не реже чем раз в 6 лет. В то же время, при выполнении КРП его срок службы может быть продлен одновременно на срок до 16 лет. Таким образом, на наш взгляд, в рамках выполнения КРП необходимо выполнять усиление наиболее проблемных зон рамы, наряду с модернизацией элементов конструкции котла.

Для проверки эффективности предложенных технических решений необходимо выполнить комплекс расчетов на прочность и долговечность металлоконструкции с учетом фактического срока службы, а также прогнозного значения его продления.

Анализ эксплуатационных повреждений элементов конструкций наливного подвижного состава. На протяжении более 15 лет сотрудниками Отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» УО «БелГУТ» выполнялся непрерывный мониторинг технического состояния грузового подвижного состава не только на Белорусской железной дороге, но и в странах ближнего зарубежья. За указанный период обследовано более 3000 грузовых вагонов. На основе полученного опыта разработаны диагностические карты, которые заполнялись индивидуально по каждому вагону, где помимо записей о наличии трещин, деформаций и прочих визуальных повреждений вагона, фиксировалось реальное физическое состояние кузова, путем проведения в контрольных точках ультразвуковой толщинометрии.

На диаграмме рисунка 1 приведено распределение количества отказов по роду вагона, где видно, что большая часть отказов возникает у крытых вагонов, полувагонов и вагонов-цистерн.

В качестве объекта исследования принята вагон-цистерна модели 15-1443, как наиболее часто встречающаяся в эксплуатации. На основе результатов визуального контроля более чем 400 единиц (средний возраст 36,4 года) построена диаграмма частоты появления характерных неисправностей относительно их общего количества, приведенная на рисунке 2. Здесь по оси абсцисс порядковый номер соответствует виду неисправности: 1 — выпучивание верхнего листа хребтовой балки в районе хвостовика автосцепного устройства; 2 — выпучивание верхнего листа хребтовой балки в средней части (за шкворневыми балками); 3 — выпучивание вертикального листа хребтовой балки в районе упоров автосцепного устройства; 4 — трещины по сварному шву в узлах сочленения хребтовой и шкворневых балок; 5 — накладка на нижней полке хребтовой балки в зоне сочленения со шкворневыми; 6 — накладка на хребтовой балке в средней части; 7 — накладка на хребтовой балке в зоне сочленения со шкворневой балкой; 8 — вертикальный прогиб продольных балок более 50 мм; 9 — трещина по основному металлу верхнего листа шкворневой балки (область сочленения с хребтовой балкой); 10 — коррозионный износ хребтовой балки более 30 %; 11 — пропеллерность рамы 40 мм на 1 м ширины; 12 — накладки в зоне сливного прибора; 13 — трещины по сварному шву

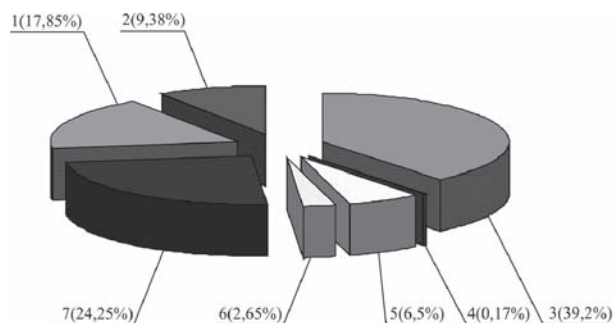


Рисунок 1 — Распределение отказов по роду вагонов:
1 — цистерны; 2 — прочие; 3 — крытые; 4 — прочие специализированные; 5 — платформы; 6 — собственные и арендованные вагоны; 7 — полувагоны

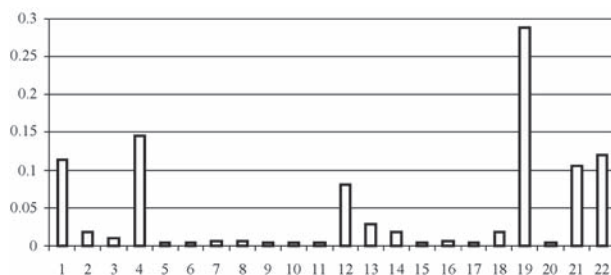


Рисунок 2 — Частота распределения неисправностей вагонов-цистерн

на броневом листе в районе сливного прибора; 14 — трещины на броневом листе в районе сливного прибора; 15 — накладка на броневом листе в районе сливного прибора; 16 — вмятина котла в районе лежней; 17 — вмятина на днище котла; 18 — расслоение металла, трещины и деформации верхнего листа котла; 19 — трещины в области приварки рамных лап к хребтовой балке; 20 — ослабление стяжных хомутов; 21 — нарушение болтового крепления котла на раме в средней части; 22 — трещины в области приварки фасонных лап к котлу.

Приведенные фактически регистрируемые неисправности во многом связаны между собой. Так, трещины в области сочленения хребтовой и шкворневых балок являются первопричиной установки накладок в этой области (позиции 4 и 5). Аналогично связаны между собой неисправности 12, 13, 14. Анализируя приведенную диаграмму, установлено, что к наиболее часто встречающимся неисправностям следует отнести появление трещин в областях среднего крепления котла на раме: место приварки рамной лапы к верхнему листу хребтовой балки и место приварки фасонной лапы к броневому листу котла. Характерно, что во многих случаях эти неисправности сопровождаются нарушениями креплений котла на раме в консольных частях (ослабление стяжных хомутов), а также отсутствием призонных болтов, соединяющих рамную и фасонную лапы, или наличием зазоров в результате овальности отверстий в местах их постановки. Достаточно часто фиксировались трещины в области установки сливного прибора и в зоне сочленения хребтовой балки со шкворневыми, а также выпучивание верхнего листа хребтовой балки в районе хвостовика автосцепного устройства. Зафиксированы случаи повреждений и течи в области установки люка-лаза на верхнем листе котла.

Модернизация котла и рамы вагона-цистерны. Котел. В рамках проведения КРП в соответствии Техническими условиями [2] согласно проекту М1670.000 наряду с постановкой усиливающих накладок на котел вагона, выполняется установка замкнутых кольцевых шпангоутов на цилиндрической оболочке. В работе [3] определено оптимальное месторасположение подкрепляющих шпангоутов по критерию обеспечения максимального коэффициента запаса потери устойчивости котла. Кроме того, как показано в [1] случаи потери устойчивости оболочки котла в эксплуатации свидетельствуют о том, что последняя имеет место в областях верхнего и среднего листов цилиндрической части. Такой эффект объясняется во-первых меньшей толщиной среднего и верхнего листа по сравнению с толщиной броневых (нижнего); во-вторых наличием в средней части броневых листа жесткой связи котла с рамой. В связи с чем,

предложен вариант повышения несущей способности котла вагона путем установки подкрепляющих незамкнутых наружных шпангоутов с полудлиной $3,2 \div 3,3$ м, которая получена также по критерию обеспечения наиболее высокого значения коэффициента запаса устойчивости цилиндрической оболочки.

Учитывая критерий выбора рациональных параметров подкрепляющих шпангоутов, возникает необходимость оценки прочности и долговечности усиленной конструкции котла вагона.

Рама. Модернизации подвергалась рама вагона-цистерны, хребтовая балка которой выполнена из двух зетобразных профилей № 31 без боковых балок. При усилении конструкции рамы вагона-цистерны рассмотрено два этапа. Первый этап включает усиление сопряжения хребтовой балки со шкворневыми накладками: снизу размером $1440 \times 500 \times 10$ мм, сверху размером $320 \times 320 \times 10$ мм. Накладки поставлены только с внутренней стороны рамы, так как трещины в хребтовой балке в основном встречаются в сопряжении с внутренними вертикальными листами шкворневых балок. На втором этапе рама дополнительно усиливалась двумя боковыми балками по длине соответствующей расстоянию между шкворневыми балками и двумя поперечными балками возле средней опоры котла, выполненными из швеллеров № 20 по ГОСТ 8240.

Результаты расчетов на прочность модернизированных конструкций котла и рамы. Для оценки прочности модернизированных конструкций котла (а) и рамы (б) вагона-цистерны разработаны их конечно-элементные модели. На рисунке 3 приведены геометрические модели котла и рамы (второй этап усиления). Геометрические модели представляют собой набор геометрических примитивов простой формы для получения регулярной конечно-элементной сетки с правильной формой элементов. Силовые и кинематические граничные условия приняты в соответствии с конструктивными особенностями вагона и рекомендациями [4].

На рисунке 4 приведены диаграммы снижения расчетных значений напряжений в контрольных зонах кот-

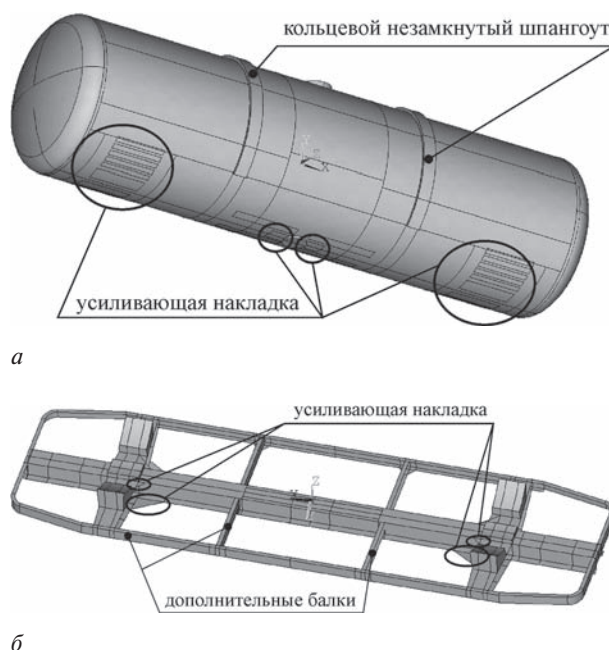


Рисунок 3 — Геометрические модели котла и рамы (второй этап усиления)

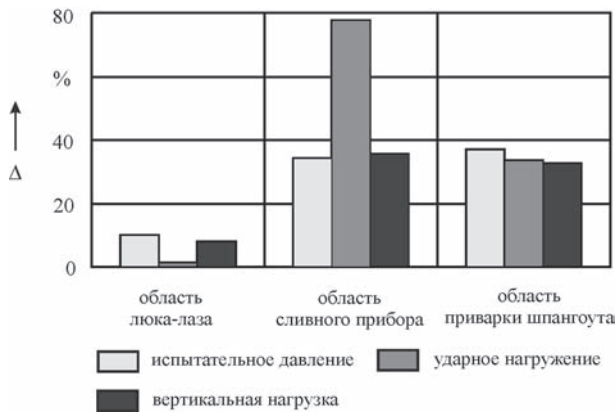


Рисунок 4 — Диаграммы снижения расчетных значений напряжений в контрольных зонах котла вагона-цистерны

ла вагона-цистерны для различных режимов нагружения. Установлено, что значения напряжений после проведенной модернизации снизились в области сливного прибора на 77 %, в области приварки шпангоута на 33,7 %, и в меньшей степени в области люка лаза — на 10 %.

В таблице приведены результаты изменения напряженного состояния рамы для I режима нагружения [4] при проведении ее поэтапной модернизации.

Анализируя данные в таблице можно сделать вывод, что локальные напряжения в хребтовой балке после усиления снизились на 52,6 % при сжатии и на 40 % при растяжении. В тоже время, следует отметить, что установка в рамках второго этапа дополнительных продольных и поперечных балок приводит к незначительному снижению напряжений, но при этом существенно повышает массу тары вагона и приводит к удорожанию КРП.

Наряду с проведенными прочностными расчетами, учитывая продление срока службы вагона целесообразно выполнить оценку долговечности несущих конструкций котла и рамы.

Расчетная оценка остаточного ресурса котла и рамы вагона из условия циклической прочности. Для оценки остаточного ресурса металлоконструкций вагонов после длительной эксплуатации предлагается методика, основанная на подходе, изложенном в [4] и [5], при котором параметром, определяющим циклическую прочность, является

Таблица — Результаты поэтапной оценки прочности рамы

Элемент конструкции	Изменение напряжений относительно исходного варианта, %			
	Этап I		Этап II	
	сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
Хребтовая балка	–3,2	–3	–5,4	–5,7
Шкворневая балка	–37	–22	–35,7	+13,2
Область сочленения хребтовой и шкворневой балок	–50	–46	–52,6	–40
Боковые продольные балки	—	—	—	—
Дополнительные поперечные балки	—	—	—	—

коэффициент запаса сопротивления усталости n , определяемый из отношения предела выносливости материала $\sigma_{a,N}$ для контрольной зоны конструкции вагона к величине амплитуды динамического напряжения $\sigma_{a,z}$, эквивалентной по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за срок службы.

Очевидно, что величина амплитуды динамического напряжения параметр, включающий в себя срок службы металлоконструкции, которой зависит от уровней амплитуд напряжений σ_{ai}^k в i -ом интервале эксплуатационных нагрузок k -го режима нагружения. Соответствующие уровни амплитуд напряжений определяются с коррекцией на возможное изменение в связи с коррозионным износом, в зависимости от особенностей эксплуатации, типа грузового вагона и перевозимого груза: при действии вертикальных динамических нагрузок, продольных ударных сил, дополнительных силовых факторов в результате взаимодействия с относительно подвижными грузами, при выполнении погрузочно-разгрузочных операций, ремонтных нагрузок и т. п.

Таким образом, выражение для определения срока службы вагона принимает вид

$$T_p = N_0 \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m}{\sum_k \left[K^k \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]},$$

где N_0 — базовое число циклов; m — показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах; K_k — коэффициент, связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для k -го режима нагружения; p_i^k — частота действия уровня амплитуд напряжений σ_{ai}^k в i -ом интервале k -го режима нагружения.

Выполним оценку возможности продления срока службы вагона после КРП на 16 лет, что будет соответ-

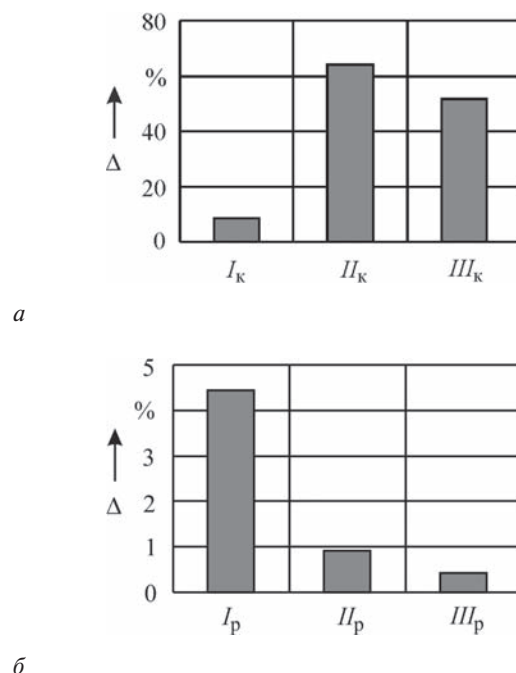


Рисунок 5 — Диаграммы изменения коэффициентов запаса сопротивления усталости котла и рамы в контрольных областях

ствовать суммарному сроку службы 48 лет (с учетом нормативного равного 32 года). За критерий обеспечения долговечности в указанный период эксплуатации прием минимально допускаемый в соответствии с [4] коэффициент запаса сопротивления усталости.

На рисунке 5 приведены диаграммы изменения коэффициентов запаса сопротивления усталости котла (*a*) и рамы (*b*) в контрольных областях, расположенных в местах возможного (исходя из практики обследования технического состояния) появления трещин по основному металлу: для котла — область люка-лаза (I_k), область сливного прибора (II_k), область приварки шпангоута (III_k); для рамы — сечение «хребтовая — шкворневая балки» на расстоянии 485 мм к консольной балке вагона (I_p), сечение «хребтовая — шкворневая балки» на расстоянии 260 мм к середине вагона (II_p), середина хребтовой балки (III_p).

Получено, что после модернизации котла вагона-цистерны коэффициент запаса сопротивления усталости существенно вырос в области сливного прибора на 64 % и в области приварки шпангоута на 51,6 % и в меньшей степени в области люка лаза на 8,6 %. Установлено, что после усиления рамы коэффициент запаса сопротивления усталости в контрольных областях изменился незначительно, что связано с локальным эффектом снижения напряжений непосредственно в местах установки подкрепляющих накладок.

Заключение. Выполненные исследования показали, что модернизация котла вагона-цистерны с использованием предложенных технических решений позволяет существенно повысить его долговечность, в то же время поэтапная оценка модернизации рамы цистерны показала, что установка дополнительных продольных балок наряду со значительным повышением массы тары вагона не является эффективным с позиции повышения прочности рамы вагона.

Список литературы

1. Путятю, А.В. Повышение несущей способности котла вагона-цистерны при капитальном ремонте с продлением срока службы / А.В. Путятю, И.И. Архутик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — 2013. — Вып. 2. — С. 261–264.
2. Модернизация четырехосных вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов с продлением срока службы (КРП). Технические условия ТУ 3182-006-44297774-04. — 39 с.
3. Шимановский, А.О., Оптимизация геометрических параметров элементов конструкции кузова железнодорожной цистерны / А.О. Шимановский, А.В. Путятю // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», 31 янв.–2 февр. — в 2 т. — М.: МИИТ, 2006. — Т. 2. — С. 443–446.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1996. — 319 с.
5. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества: РД 24.050.37–95. — Введ. 02.02.1995. — М.: ГосНИИВ, 1995. — 101 с.

Putsiata A.V., Belahub V.V., Arkhutsik I.I.

Modernization of the boiler and a frame of the tankcar after long work with the calculation of the residual resource

Technical solutions on modernization of a design of a boiler and a frame of the tankcar for transportation of oil products of model 15-1443 after long work are proposed. The complex of calculations on durability of a metal construction of the tankcar taking into account actual a condition of its elements (corrosion wear) is executed, and also the assessment of a residual resource of bearing designs after modernization is made. Decrease in level of tension in the most loaded areas of designs is established, and data on increase in coefficient of a stock of fatigue durability as a result of work on modernization are also provided.

Поступил в редакцию 27.06.2014.