

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БРАКОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН

Розглянута класифікація бракувальних характеристик по місцезнаходженню і впливу на працездатність вагонів-цистерн, а також вплив дефектів, що призводять до вм'ятин, днища котла на можливість його експлуатації.

Рассмотрена классификация браковочных характеристик по местонахождению и влиянию на работоспособность вагонов-цистерн, а также влияние вмятинообразных дефектов днища котла на возможность его эксплуатации.

The paper presents the results of simulation of the strain-stress fields in the bottom of a tank-car with different damages. Aims of the further research are formulated.

Вагон-цистерна представляет собой сложнейший технический объект, который эксплуатируется в самых различных, зачастую весьма жестких условиях. Вагоны-цистерны к настоящему моменту составляют 13% общей численности вагонного парка, причем 83% из них составляют вагоны-цистерны для перевозки нефтепродуктов. При этом учесть все нюансы условий эксплуатации на стадии проектирования и даже опытной эксплуатации не представляется возможным. В связи с этим существенная часть цистерн рабочего парка имеет повреждения, в некоторых случаях приводящие к отказу. Одним из наиболее опасных типов повреждений являются повреждения несущей конструкции цистерны, и, в частности, наиболее ответственного узла несущей конструкции – котла цистерны. Установлено, что в настоящее время в эксплуатируемом парке около 2% нефтебензиновых цистерн имеют повреждения несущей конструкции котла, а в случае цистерн для перевозки химических продуктов доля поврежденных цистерн еще больше. В то же время существует обратная ситуация, когда цистерна, подлежащая списанию по сроку службы, обладает значительным неизрасходованным ресурсом. Таким образом, решение проблемы повышения безопасности и экономической эффективности перевозок грузов вагонами железнодорожного транспорта может заключаться в дифференцированном подходе к назначению межремонтных, полных и новых сроков службы вагонов на основе выбора комплекса браковочных характеристик и методики выявления повреждений несущих конструкций вагонов.

На первом этапе был произведен выбор комплекса браковочных характеристик повреждений несущих конструкций вагонов-цистерн.

Повреждения несущих конструкций вагонов-цистерн имеют весьма разнообразные причины возникновения и места локализации. В результате обобщения статистической информации о повреждениях несущих конструкций вагонов-цистерн и данных сравнительных испытаний можно выявить основные закономерности появления и развития повреждений (табл.).

В связи с тем, что самый большой ресурс в конструкции вагона-цистерны имеет её котел, в дальнейшем будет рассматриваться определение браковочных характеристик котлов нефтебензиновых вагонов-цистерн.

В настоящий момент в существующем парке железнодорожных цистерн преобладают цистерны с котлами 62 калибра, собранными из продольных листов (модели 15-1443, 15-1547, 15-1672). Основным материалом для изготовления этих котлов служит низколегированная сталь 09Г2С, гораздо реже, в основном у котлов старой конструкции, встречается сталь 09Г2 или ВСтЗсп5. В связи с этим в дальнейших исследованиях конструкция котла модели 15-1443 изготовленного из стали 09Г2С принимается за основную.

Основными вопросами, возникающими при определении браковочных характеристик вагонов-цистерн, являются оценка степени влияния повреждений на несущую способность вагонов и определение изменения остаточного ресурса вагона с повреждениями относительно неповрежденного вагона. При этом необходимо учитывать, что сложившаяся практика капитальных и капитально-восстановительных ремонтов предполагает восстановление ресурса вагона-цистерны путем замены поврежденных рам и ремонтом котла как наиболее ценной части вагона.

Для решения этих вопросов были проведены теоретические исследования по оценке несущей способности котлов нефтебензиновых цистерн со следующими типами повреждений: деформации днища котла; коррозионный износ котла.

Вмятины на днище котла являются одним из весьма распространенных типов повреждений котлов цистерн. По некоторым экспертным оценкам до 30% цистерн, приходящих на

Таблица.

Повреждения несущих конструкций четырехосных нефтебензиновых вагонов-цистерн

№	Повреждение	Причина возникновения	Развитие и последствия
1	2	3	4
1	Вмятины и трещины в зоне продольного сварного шва, соединяющего панели обечайки котла, в верхней части опоры котла	- конструктивная концентрация напряжений; - превышение грузоподъемности цистерны в эксплуатации; - повышенные скорости соударений при маневровых работах	- открытие течи; - развитие трещины и разрушение обечайки;
2	Трещина вдоль нижней образующей котла в зоне опоры	- те же	- те же.
3	Трещины обечайки котла в зоне сливного прибора	- конструктивная концентрация напряжений;	- открытие течи.
4	Трещины в зоне приварки кронштейнов лестницы к котлу	- концентрации напряжений в сварных швах приварки	- развитие трещины и открытие течи.
5	Трещины обечайки в зоне приварки фасонных лап крепления котла к раме	- высокий уровень напряжений в зоне лап при маневровых работах; - начальные трещиноподобные дефекты сварных швов.	- открытие течи; - развитие трещины и разрушение обечайки котла; - нарушение связи "рама – котел" и сброс котла.
6	Трещины обечайки в зоне приварки горловины люка-лаза.	- конструктивная концентрация напряжений; - дефекты сварных швов.	- нарушение герметичности котла.
7	Трещины в зоне соединения обечайки котла с днищем	- высокие напряжения от гидроудара; - дефекты сварных соединений.	- развитие трещины и нарушение целостности котла.
8	Деформации днища котла	- аварийные ситуации; - нарушение габаритных ограничений; - нарушение правил погрузки и крепления грузов.	- снижение прочности и устойчивости оболочки.
9	Трещины в зоне шкворневого узла рамы цистерны	- многоцикловая усталость вследствие боковой качки вагона; - малоцикловая усталость при продольных эксплуатационных нагрузках; - дефекты сварных соединений.	- возможно развитие трещин и разрушение хребтовой балки.
10	Трещины хребтовой балки в зоне крепления тормозного цилиндра	- конструктивная концентрация напряжений; - инерционные нагрузки при маневровых соударениях.	- То же.

1	2	3	4
11	Локальная потеря устойчивости верхней полки хребтовой балки	<ul style="list-style-type: none"> - внецентренное приложение нагрузок сжатия при деформировании задних упоров автосцепного устройства; - передача ударных сжимающих нагрузок через ударную розетку при деформировании задних упоров и корпуса поглощающего аппарата. 	<ul style="list-style-type: none"> - причины возникновения повреждения приводят в дальнейшей эксплуатации к искривлению хребтовой балки в целом.
12	Искривление консольной части хребтовой балки	<ul style="list-style-type: none"> - то же 	<ul style="list-style-type: none"> - потеря хребтовой балкой несущей способности.
13	Выпучивание верхнего листа хребтовой балки в районе автосцепного устройства	<ul style="list-style-type: none"> - маневровые соударения с значительным эксцентриситетом приложения продольной нагрузки. 	<ul style="list-style-type: none"> - отрыв верхнего листа хребтовой балки; - перекося и повреждение поглощающего аппарата; - деформации задних упоров автосцепного устройства
14	Трещины сварных швов крепления фасонных лап рамы к хребтовой балке.	<ul style="list-style-type: none"> - высокий уровень напряжений в зоне лап при маневровых работах; - начальные трещиноподобные дефекты сварных швов. 	<ul style="list-style-type: none"> - в некоторых случаях развитие трещины на хребтовую балку.

промывно-пропарочные станции, имеют вмятины на днище различной глубины и местоположения.

Для определения влияния такого повреждения был проведен комплекс исследований, решающий следующие задачи:

- анализ статической прочности днища котла цистерны с вмятиной и определение наилучших параметров вмятины с точки зрения прочности;
- анализ процесса деформирования днища котла при квазидинамическом нагружении и определение критических параметров нагружения с точки зрения обеспечения прочности котла;
- анализ развития микрповреждений днища котла в зоне вмятины при квазидинамическом нагружении и влияния их на остаточный ресурс котла.

В связи с высокой сложностью аналитического описания напряженно-деформированного состояния днища котла с повреждением типа вмятины в процессе исследования использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный на базе рабочей станции с процессором Intel Cooremine с применением прикладного программного обеспечения МКЭ Ansys 5.5.1. Адекватность использованных алгоритмов данного программного продукта подтверждена сертификатом ISO 9001. Для исследования ста-

тического линейного напряженно-деформированного состояния в конечно-элементной модели использовались оболочечные конечные элементы с переменным порядком полинома функции формы (p-элементы). Применение таких элементов позволило в процессе исследования получать напряженно-деформированное состояние модели с заданной вычислительной погрешностью. Сетка конечных элементов формировалась адаптивно с увеличением плотности сетки в зоне повреждения с учетом вероятных градиентов напряжений. В исследовании анализировалось напряженно-деформированное состояние котла, при первом и третьем режимах нагружения согласно «Норм по расчету и проектированию грузовых вагонов...». При первом режиме котел одновременно нагружался:

- продольным ускорением $3,5 \times 9,81 \text{ м/с}^2$ и соответствующим гидравлическим квазидинамическим давлением груза, распределенным по оболочке котла по линейно нарастающему вдоль продольной оси вагона закону;
- собственным весом и весом груза, распределенным по оболочке котла как гидростатическое давление.

При третьем режиме котел нагружался:

- продольным ускорением $1 \times 9,81 \text{ м/с}^2$ и соответствующим гидравлическим квазидинамическим давлением груза, распределенным

по оболочке котла по линейно нарастающему вдоль продольной оси вагона закону;

- собственным весом и весом груза, распределенным по оболочке котла как гидростатическое давление, с учетом коэффициента динамики, который рассчитывался по формуле 2.1 «Норм...».
- боковым ускорением и соответствующим гидравлическим квазидинамическим давлением груза, распределенным по оболочке котла по линейно нарастающему по горизонтали перпендикулярно продольной оси вагона закону; величина ускорения рассчитывалась из расчетного значения рамной силы и боковых сил (согласно «Норм...»).

Для обеспечения адекватных условий закрепления в модели была реализована часть опоры с опорными брусками и площадкой их опирания. Свойства материала конечных элементов имитирующих опорные бруски принимались в соответствии с приложением 15 «Норм...» (листенница).

Закрепления к расчетной схеме прикладывались в узлах соответствующих зонам опирания брусков на опоры и верхний лист шкворневой балки в направлении перпендикулярном поверхности опирания.

Кроме указанных выше было проведено исследование влияния на несущую способность длинноразмерных изменений формы и износа обечайки котла, которые возникают в результате: перегрузки вагона вследствие перевозки нефтепродуктов тяжелых марок в бензиновых цистернах; нарушения правил эксплуатации при проведении разгрузочных и промывочно-пропарочных работ; неисправности впускного клапана и коррозионный износ обечайки котла. В результате были получены допустимые глубины вмятинообразных повреждений котла цистерны, при различных толщинах элементов её обечайки.

В результате проведенных теоретических исследований установлено следующее:

1. все многообразие повреждений несущей конструкции котлов нефтебензиновых цистерн можно разделить на две категории: изменения формы оболочки котла и трещи-

ны сварных швов и основного металла. В свою очередь изменения формы оболочки можно разделить на деформации, вызванные нарушением условий эксплуатации (вмятины днища и обечайки), и вмятины в зоне лежневых опор, вызванные систематическим перегрузом цистерн;

2. днища котлов цистерн с вмятинами глубиной не более 300 мм и радиусом перехода металла вмятины к основному металлу днища не менее 100 мм имеют значительный запас прочности по критериям предельных деформаций (более 5), статического трещинообразования (2,42) и усталостного трещинообразования (4,09);
3. оценка возможности эксплуатации котлов с вмятинообразными повреждениями днища должна производиться из условий отсутствия значительных трещин в зоне сварных швов, затронутых вмятиной, и в местах наклепа и перегиба металла днища, а также из условий коммерческой допустимости уменьшения полезного объема котла;
4. наиболее опасным видом вмятинообразных повреждений обечайки котла являются длинноразмерные изменения формы котла, соответствующие первой форме потери устойчивости (проседание и наклон верхней части обечайки, вмятость боковой части). При этом основным критерием несущей способности котла является устойчивость оболочки под действием внешнего давления;
5. полученные в результате исследований зависимости допускаемой глубины вмятинообразных повреждений днища обечайки от толщины ее частей позволяют с необходимой точностью оценить возможность эксплуатации цистерн с данным видом повреждений.

В дальнейших исследованиях предполагается выявить влияние местоположения и величины вмятинообразных дефектов цилиндрической части котла на его устойчивость в зависимости от величины коррозии его элементов.