

БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

УДК 621.791

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук; А. С. СНАРСКИЙ, кандидат технических наук; В. А. ПИСАРЕВ, заведующий Научно-исследовательской лабораторией сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОТЛОВ-ЦИСТЕРН, НАХОДЯЩИХСЯ ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрены результаты контроля металла железнодорожных котлов-цистерн, которые находятся в эксплуатации длительное время (более 30 лет). Установлены особенности разрушения металла: типичным является образование трещин по основному металлу в области крепления сливного прибора. Проанализированы методы неразрушающего контроля металла и даны рекомендации по набору методов неразрушающего контроля, позволяющих проводить эффективный мониторинг состояния металла цистерн.

Введение. Эффективные решения вопросов надежной эксплуатации различных металлических конструкций, по нашему мнению, весьма востребованы в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и строительной, транспортной и ряде других отраслей. Аварийное разрушение различных металлоконструкций приводит ежегодно к многомиллиардным финансовым потерям и человеческим жертвам. Вероятность аварийного разрушения практически любой металлоконструкции повышается с увеличением срока ее эксплуатации, что связано с физическими процессами старения металла. Характерной особенностью проявления старения большинства конструкционных углеродистых и низколегированных сталей является снижение сопротивления металла ударному воздействию (ударной вязкости). Так, например, для большинства трубных (марганцево-кремниевых) сталей после 30 лет эксплуатации ударная вязкость может снижаться в 3–6 раз и быть значительно меньше допустимых значений [1]. К указанным выше объектам в полной мере относятся различные емкостные металлоконструкции, предназначенные для транспортировки сыпучих и жидких веществ, в т. ч. железнодорожные котлы-цистерны (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид контролируемых котлов-цистерн

Основная часть. Вопрос поиска эффективных методов контроля состояния металла указанных объектов обострился в последние годы в связи с участившимся трещинообразованием в области крепления сливного прибора на ряде котлов-цистерн, эксплуатирующихся с семидесятых годов XX в.

Первичный анализ особенностей разрушения котлов-цистерн в зоне крепления сливного прибора был проведен на вырезках из дефектных цистерн на базе Полоцкого вагонного депо Витебского отделения Белорусской железной дороги. Установлены следующие особенности разрушения, характерные практически для всех котлов-цистерн с обнаруженными дефектами:

– в нижней внутренней части цистерны в области крепления (с использованием сварки) сливного прибора по броне листу характерно наличие коррозионных повреждений основного металла в виде коррозионных язв различной глубины и плотности с максимальной интенсивностью в области заводской вальцовки (технологической выштамповки под лучший слив транспортируемого нефтепродукта) (рисунок 2);

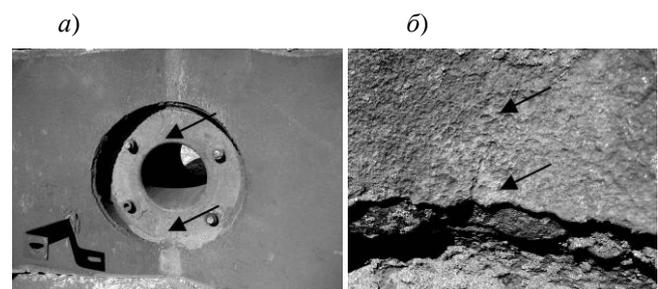


Рисунок 2 – Внешний вид и конструктивные особенности внутренней части броневого листа котла-цистерны в месте крепления сливного прибора:

а – конструктивные особенности узла присоединения сливного прибора (область выштамповки цилиндрической обечайки – область повышенной склонности к трещинообразованию (показана стрелками); б – характерный коррозионный износ внутренней части броневого листа и трещина по выштамповке (показана стрелками)

– типичным является наличие продольных трещин по броне листу, распространяющихся, как правило, по выштамповке под слив нефтепродуктов (указано стрелками на рисунке 2, б);

– типичным также является усталостный характер развития указанных трещин, что подтверждается различной степенью и толщиной коррозионных отложений на изломах;

– указанные трещины распространяются с внутренней части листа (поверхности листа, обращенной к транспортируемому продукту) с последующим сквозным распространением вдоль листа и выходом наружу на определенной стадии развития трещины, что вызывает потерю герметичности котлов-цистерн, вплоть до аварийной ситуации;

– котлы-цистерны с трещинами в области крепления сливного прибора имеют срок эксплуатации, как правило, более 30 лет [год изготовления дефектной цистерны с характерной трещиной, проанализированной на базе Полоцкого депо в июле 2010 г., – 1974 г. (цистерна эксплуатировалась 36 лет)], т. е. очевидно, что зарождение и распространение трещин связано в том числе и со старением металла при длительной эксплуатации цистерны.

Было проанализировано возможное материальное исполнение котлов-цистерн. Так, согласно п. 2.16 ГОСТа 10674-82 «Вагоны-цистерны магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие ТУ» котлы нефтеналивных цистерн (для вязких нефтепродуктов) должны быть изготовлены из качественной стали 09Г2С по ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной сталей для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия», ГОСТ 19281-89 «Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия». Допускается изготовление котлов из стали обыкновенного качества ВСт3сп по ГОСТ 380-94 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки». Таким образом, возможными материалами для изготовления котлов-цистерн (в том числе броневого листа) являются стали двух марок: основная – качественная низколегированная сталь на базе марганца и кремния 09Г2С и углеродистая сталь обыкновенного качества Ст3.

Методику неразрушающего контроля состояния металла цистерны решено было разрабатывать с использованием установленных ранее в процессе исследований и апробации на других конструкциях основополагающих принципов [3]:

– принцип комплексности – обязательности использования нескольких неразрушающих методов контроля фактического состояния объекта и материала, из которого он изготовлен;

– принцип «наиболее слабого места»: решение о допуске конструкции к эксплуатации принимается только после получения удовлетворительных экспериментальных значений замеренных характеристик в наиболее слабом месте конструкции (в нашем случае – в области технологической выштамповки).

В связи с указанными принципами были проработаны различные потенциально возможные методы контроля с учетом особенностей объекта и главной цели диагностики: определения допустимого состояния эксплуатации цистерны по критерию гарантированного отсутствия разрушений (трещин) в области выштамповки цилиндрической обечайки возле сливного прибора (см. рисунок 2).

Окончательная корректировка методов проводилась как на цистернах (в условиях Полоцкого железнодорожного депо), так и на полнотолщинных вырезках из котлов-цистерн размерами 1×1,5 м в условиях лаборатории на базе НИЛ сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля НИЧ БНТУ).

Рассмотрим особенности проведения магнитного контроля (контроля по коэрцитивной силе) в привязке к объекту исследований – котлу-цистерне. Указанный контроль основан на установленной устойчивой зависимости между уровнем напряжений в металле диагностируемой конструкции и значениями коэрцитивной силы, которая измеряется приборным методом путем намагничивания и размагничивания конструкции в локальном месте воздействия специального датчика со встроенным П-образным электромагнитом [10]. При указанных работах был использован магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М (производство научно-производственного объединения «Спецтехнология», г. Харьков, Украина) (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид применяемого при контроле металла цистерн структуроскопа

Проведенные на котлах-цистернах работы показали высокую чувствительность магнитного метода контроля (контроля по коэрцитивной силе) к уровню напряжений в конструкции. Так, например, при значениях коэрцитивной силы по основному металлу, равных 3,1–3,4 А/см, по ремонтным сварным швам указанные значения составляют 4,6–5,1 А/см, что говорит о повышении значения напряжений примерно в 1,5 раза и возрастании вероятности разрушения именно по ремонтным сварным соединениям.

Установлена также возможность контроля фактического напряженного состояния металла в критической области – зоне присоединения сливного прибора. Так, для разных цистерн значения коэрцитивной силы, а следовательно, и значения напряжений в критических точках (участках потенциального зарождения и развития трещин) превышают средние значения по основному металлу в 1,2–1,5 раза. Это говорит о возможности выявления цистерн при их диагностировании с максимальной вероятностью разрушения еще до образования трещин с целью вывода их из эксплуатации и проведения ремонтных мероприятий. Результаты замера коэрцитивной силы по технологической выштамповке – основной, наиболее слабой критической области одной из цистерн, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по определению твердости и коэрцитивной силы

№* п/п	Значения замеренной твердости, НВ	Среднее значение твердости НВ _{ср}	Допустимые диапазоны твердости** [2]	Коэрцитивная сила, А/см
1	162, 173, 183, 144	165,5	120–160***	3,7
2	131, 160, 148, 152	147,8	120–160***	3,5
3	129, 134, 131, 129	130,8	120–160***	3,3
4	134, 122, 127, 124	126,8	120–160***	3,2

* С учетом материального исполнения – цистерна изготовлена из стали Ст3.
 ** № 1–4 – замер по выштамповке; № 1 – максимально близко к технологическому отверстию (на рисунке 4 – крайняя левая стрелка).
 *** Допустимое отклонение указанных пределов не должно превышать +20 и –10 НВ [2].

Рассмотрим особенности определения твердости неразрушающим методом с учетом возможности их применения при диагностике котлов-цистерн. В качестве твердомера использовали переносной твердомер ТЭМП-4. Замер твердости проводили по выштамповке после определения коэрцитивной силы (см. рисунок 4 и таблицу 1).

На основании полученных данных (см. таблицу 1) можно сделать следующие выводы:

– металл цистерны по твердости находится в допустимых пределах, однако его твердость в точке № 1 находится практически на границе допустимости, что свидетельствует о необходимости мониторинга состояния металла, в первую очередь, по данной точке при очередном обследовании этой же цистерны. Если твердость будет превышать допустимый диапазон с учетом допуска (см. примечание*** к таблице 1), то следует запретить допуск цистерны к эксплуатации, т. к. превышение значения по твердости свидетельствует о снижении пластических характеристик металла и повышении вероятности трещинообразования в данном месте конструкции;

– средние замеренные значения твердости полностью коррелируют с полученными значениями коэрцитивной силы (№ 1 – максимальная твердость и максимальная коэрцитивная сила, что говорит об максимальных напряжениях на этом участке и деформационном упрочнении металла в области выштамповки, которое сопровождается повышением твердости и снижением пластичности; № 4 – минимальная твердость и минимальная коэрцитивная сила).



Рисунок 4 – Внешний вид котла-цистерны при контроле твердости по выштамповке внутри (места замера показаны стрелками)

Вместе с тем, следует отметить высокий разброс в полученных значениях твердости (10–18 %), тогда как при замере коэрцитивной силы в одной точке разброс значений составляет примерно 2–5 %.

Заключение. Таким образом, с учетом особенностей объекта (котла-цистерны) и сварного узла; материального исполнения; необходимости выявления критического состояния (склонности к трещинообразованию) на ранней стадии процесса, а также с учетом обобщений рекомендаций [2–8], в качестве основных методов контроля котлов-цистерн (в первую очередь в области крепления сливного прибора) предложено использовать:

1) *визуальный контроль* с целью выявления:

– трещин (в первую очередь внутри цистерны в области технологической выштамповки);
– степени коррозионных повреждений внутри цистерны в области технологической выштамповки;
– дефектов сварки и вырезки технологических отверстий по броневому листу для установки сливного прибора;

2) *цветную дефектоскопию* с целью выявления трещин (в т. ч. и микро), выходящих на поверхность по броневому листу, в первую очередь в области технологической выштамповки;

Получено 26.11.2012

F. I. Panteleenko, A. S. Snarski, V. A. Pisarev. The development of effective methodology of nondestructive inspection of tanks car, that used for a long period of time.

The results of inspection of tanks car, that used for a long period of time (more than 30 years), are observed in this article. The features of destruction of metal are detected: the formation of cracks in main metal in area of outlet cock attachment is typical. The methods of nondestructive inspection of metal are studied and the prompts for selection of method of nondestructive inspection, which allows to carrying out an effective metal tanks car state monitoring, are given.

3) *измерение твердости* с целью определения фактического уровня твердости и соответствия фактических замеренных значений допустимому диапазону значений (в первую очередь по броневому листу);

4) *магнитный контроль (по коэрцитивной силе)* с целью определения фактического напряженно-деформированного состояния металла, уровня внутренних напряжений и возможности эффективной отбраковки конструкции по данному параметру (в первую очередь при контроле металла по «наиболее слабому месту» – по броневому листу);

5) *ультразвуковой контроль* с целью:

– выявления трещин, в том числе микротрещин (в первую очередь по броневому листу);

– определения толщины металла и выполнения его отбраковки при значениях, превышающих минимально допустимые (в первую очередь по броневому листу);

6) *металлографический контроль (полевая металлография)* с целью определения недопустимых аномалий структуры металла в контролируемом узле (дополнительный метод при спорных результатах, полученных вышеперечисленными методами).

При этом применение магнитного контроля (по коэрцитивной силе) и определение твердости переносными твердомерами позволяют проводить предварительную отбраковку цистерн, имеющих высокую склонность к трещинообразованию, а также вести эффективный мониторинг состояния цистерн, значения замеренных характеристик которых (твердости и коэрцитивной силы) близки к критическим значениям, что позволит повысить надежность их эксплуатации и снизить вероятность повреждений, а также возможных аварий.

Список литературы

1 **Иванцов, О. М.** Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О. М. Иванцов // Трубопроводный транспорт. – 1997. – № 10. – С. 26–31.

2 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Мн. : ДИЭКОС, 2006. – 203 с.

3 **Пантелеенко, Ф. И.** Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций : [монография] / Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский. – Мн. : БНТУ, 2010. – 196 с.

4 **Пантелеенко, Ф. И.** Концепция системы неразрушающего контроля механических свойств и оценки потенциальной надежности и безопасности ответственных изделий при их изготовлении, ремонте и эксплуатации / Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 2. – С. 44–49.

5 **ГОСТ Р 52330–2005.** Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.

6 **ГОСТ Р 53006–2008.** Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2008. – 9 с.

7 **СО 153-34.17.439–2003.** Инструкция по продлению срока службы сосудов, работающих под давлением. – М. : СПО ОРПРЭС, 2003. – 26 с.

8 **РД 09-102–95.** Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России. – М. : Стандартинформ, 2008. – 12 с.

9 **Безлюдько, Г. Я.** Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужижкий, Б. Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. – № 9. – Т. 65. – С. 53–57.