

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С ДВОЙНОЙ СТЕНКОЙ

А. Ю. БАРВИНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена задача повышения надежности двухстенчатых резервуаров для хранения нефти. Показано, что установка на нижних поясах основной и вспомогательной стенки специальных бандажей не решает полностью поставленной задачи. Предложено повышать надежность основной стенки путем применения к оценке качества листового проката деформационного критерия раскрытия вершины дефекта K_c , которому удовлетворяют стали нового поколения — ниобийсодержащие стали контролируемой прокатки. Существенное увеличение вязкостных свойств листового проката стенки позволит гарантированно обнаруживать и устранять дефекты в докритическом их состоянии на основной стенке.

Ключевые слова: сварные конструкции, резервуары с двойной стенкой, ниобийсодержащие стали, трещиностойкость, вязкие разрушения, критерии хрупкости

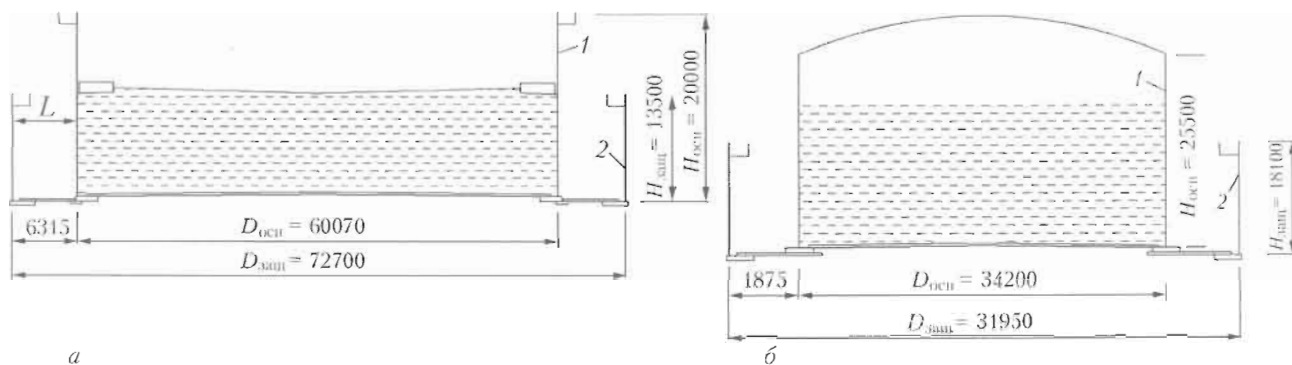
Увеличение мощностей заводов по переработке нефти в процессе их модернизации на основе новейших технологий и недостаточная стабильность цен на нефть на мировом рынке диктуют необходимость увеличения вместимости существующих сырьевых нефтепарков. В то же время постоянное повышение стоимости земли и стесненность прилегающих к нефтебазам территорий вызывает необходимость поиска нетрадиционных способов возрастания вместимости нефтепарков без увеличения площади их застройки.

В последние годы наблюдается тенденция отказа от устройства земляного или железобетонного обвалования вокруг емкостей путем строительства резервуаров с двойной стенкой типа «стакан в стакане» [1]. В этом случае емкость состоит из двух резервуаров: внутреннего (основного) и наружного (защитного). Последний резервуар предупреждает разлив нефти за пределы защитной стенки при локальных или лавинных разрушениях основного резервуара. Если вопрос локализации разлива нефти в пределах стенки защитного резервуара при местных разрушениях основной стенки не вызывает сомнения, то вопрос работоспособности защитной стенки при протяженном вязком (лавинообразном) разрушении основной стенки требует отдельного рассмотрения.

Гипотетически мгновенное разрушение стенки основного резервуара по всей ее высоте может быть хрупким или вязким. Для хрупкого разрушения характерно отсутствие деформаций на кромках разрыва у сталей с низкими значениями ударной вязкости. Движущей силой хрупкого разрушения является упругая энергия стенки (энергия Гука). Высокие требования к минимальным значениям ударной вязкости (по Шарпи), способу

выплавки и химическому составу сталей для стенки резервуаров и сварных соединений в действующих нормах ведущих стран [2–4] позволили практически полностью исключить хрупкие разрушения. Зарождение и развитие хрупкой трещины в стенке возможно только в локальных местах с низкими вязкими свойствами или в участках, где высокие вязкие свойства не могут реализоваться. В частности, это могут быть области с наличием объемного напряженного состояния, характерного для мест с наклепом поверхностного слоя вследствие ударных воздействий, участков сварных швов с трещиноподобными дефектами или закалочными структурами. При наличии в вершине дефекта в сварном шве двухосного и особенно трехосного напряженного состояния возникают благоприятные условия для зарождения и развития хрупкой трещины. В этом случае стесненность развития деформаций не позволяет реализоваться высоким пластическим свойствам материала стенки.

В процессе развития хрупкая трещина выходит за пределы дефекта. Там начинают проявляться высокие пластические свойства материала стенки и его сварных соединений. Трещина переходит в квазихрупкую, а затем и в вязкую. Скорость подрастания вязкой трещины и ее критическая длина определяются значением ударной вязкости материала стенки, нормируемыми действующими стандартами. Многолетний опыт эксплуатации резервуарных парков в Украине, России и других странах показывает, что принятые в нормах [2–4] правила выбора марки стали и ее ударной вязкости в сочетании с правилами эксплуатации емкостей обеспечивают требуемую работоспособность на протяжении всего гарантированного срока службы резервуаров обычной конструкции. При наличии обвалования вокруг резервуаров персонал технического надзора имеет хорошие возможности для ежедневного визуального осмотра всех емкостей, что позволяет с достаточной



Схемы резервуаров конструкции «стакан в стакане» вместимостью 50 (а) и 20 тыс. м³ (б): 1, 2 — соответственно стенка основного и защитного резервуара; L — расстояние между стенками

степенью вероятности визуально выявлять на наружной поверхности стенки сквозные дефекты длиной 10...50 мм, т. е. до их критических значений.

Применение резервуаров конструкции типа «стакан в стакане» существенно ухудшает условия планового ежедневного контроля технического состояния внутреннего (основного) резервуара.

На рисунке приведены схемы некоторых проектных решений резервуаров с двойной стенкой вместимостью 20 и 50 тыс. м³. Резервуар вместимостью 20 тыс. м³ имеет основную стенку высотой $H_{осн} = 22,5$ м и защитную $H_{защ} = 18,1$ м при расстоянии между ними $L \approx 2,0$ м. В резервуаре вместимостью 50 тыс. м³ принято $H_{осн} = 20,0$ м и $H_{защ} = 13,5$ м при расстоянии между ними $L \approx 5,4$ м. Если на резервуаре вместимостью 50 тыс. м³ условия визуального осмотра основной стенки с кольцевой площадки, расположенной по верху защитной стенки, можно считать в определенной степени приемлемыми, то выполнить качественный осмотр стенки для резервуара вместимостью 20 тыс. м³ при $L \approx 2,0$ м весьма затруднительно. Усложняет осмотр патрубков люков и подводящих трубопроводов в нижнем поясе возможность загазованности пространства между стенками и наличие отложений снега зимой.

Изменения установившихся условий технического надзора за состоянием работоспособности стенки основного резервуара необходимо учитывать при разработке его основных технических решений и правил эксплуатации.

Распространено мнение, что защитная стенка в состоянии не только локализовать разлив нефти при местном повреждении основного резервуара, но и воспринять гидравлический удар при лавинном разрушении основной стенки. В ряде случаев в процессе проектирования такая способность защитной стенки обосновывается расчетами и установкой специальных бандажей. При этом не до конца анализируется то обстоятельство, что при лавинном разрушении нагрузка на дополнительную стенку прикладывается локально, вдоль од-

ной из образующих на всю высоту. Движущей силой вязкой трещины после достижения критической длины будет давление на ее берега столба вытекающей жидкости (нефти или другого продукта хранения), расположенной выше трещины. При раскрытии берегов в вершине трещины образуется ядро текучести, в котором материал стенки последовательно течет, упрочняется и по достижению $\sigma_{вр}$ происходит его разрыв. Затем наступает новый цикл с образованием новой зоны пластичности [5, 6]. Скорость движения вязкой трещины в резервуарах зависит от давления на ее берега истекающей нефти, а в магистральных газопроводах от давления истекающего газа [5]. Натурными испытаниями для магистральных газопроводов установлено, что при давлении в трубе 6...7 МПа скорость трещины составляет 250...300 м/с [7]. Для резервуаров нет таких прямых данных. На основании описания отдельных случаев лавинных разрушений резервуаров [7] при давлении на берега вязкой трещины 0,10...0,15 МПа разрушения происходили в пределах 1 с. Истекающий из раскрывшейся трещины продукт хранения динамически будет воздействовать на вспомогательную стенку по одной из образующих. Являясь тонкостенной оболочкой, при таком нагружении стенка мгновенно теряет устойчивость и принимает форму вытянутого эллипса. Не исключается, что при этом произойдет и разрыв стенки по образующей. Поиски решений по приданию вспомогательной стенке дополнительной жесткости и прочности для восприятия динамического воздействия истекающей жидкости, по нашему мнению, могут привести только к значительным затратам металла, без получения достаточных гарантий работоспособности дополнительной стенки при лавинном вязком разрушении основной.

Цель настоящей работы — обосновать повышение надежности резервуаров с двойной стенкой путем дополнения нормативных требований по выбору марок сталей для стенки основного резервуара и резервуаров обычной конструкции

большой вместимости, учитывая критерий трещи-
нотойкости — характеристику раскрытия верши-
ны трещины δ_c . Предлагаемая характеристика
учитывает пластические деформации, предше-
ствующие достижению трещиной критической дли-
ны и будет гарантировать самоостановку процесса
развития зародившейся трещины до достижения
ее критического значения. В работе [8] показано,
что при $\delta_c = 0,17...0,18$ мм докритические зна-
чения сквозной трещины достигают 60 мм, что
позволяет гарантированно их выявлять по исте-
чению продукта хранения. Приведенным значе-
ниям δ_c соответствуют значения ударной вязкости
при $KCV_{-20} \geq 80$ Дж/см² [8, 9]. Вопросы выяв-
ления вязких трещин при докритическом их раз-
витии в стенке труб магистральных газопроводов
на достаточно высоком уровне рассмотрены О. М.
Иванцовым [10, 11], Д. Броеком [9] и др. При
этом напряжения в вершине трещины стенки оце-
нивали критерием K_c — коэффициентом интен-
сивности напряжений. Разница в подходах состо-
ит в том, что определение δ_c выполняется с
учетом пластических деформаций в вершине тре-
щины, а при определении K_c исходят из наличия
в вершине трещины упругой и весьма незначи-
тельной доли пластической составляющей в δ_c .
Зависимости $\delta_i \rightarrow KCV$ и $K_c \rightarrow KCV$ близки по
виду [9]. Накопленные экспериментальные дан-
ные позволили установить указанные зависимо-
сти для ниобийсодержащих сталей «контролируе-
мой прокатки» как наиболее отвечающие тре-
буемым значениям δ_c и K_c [9, 10]. Переход от
критериев δ_c и K_c к общепринятому в металлур-
гическом производстве для листового проката
значению KCV позволяет практически использо-
вать полученные результаты. Так, канадская фир-
ма «Nova» нормирует ударную вязкость на об-
разцах Шарпи, допускающую наличие сквозного
дефекта определенной длины при рабочих коль-
цевых напряжениях, которые не превышают на-
пряжения, соответствующие 80 % минимального
предела текучести стали класса X70 (табл. 1) [11].

Рассмотрим возможность применения для ос-
новной стенки резервуаров типа «стакан в ста-
кане» сталей контролируемой прокатки типа клас-

Таблица 1. Требования фирмы «Nova» (Канада) к
трубам из стали класса X70 [11]

Наружный диаметр, мм	KCV_{-20} , Дж/см ²	Размер критического сквозного дефекта, мм (90 % максимально-го возможного дефекта)
914	47	14
1067	55	135
1219	69	155
1422 ($P_{\text{раб}} = 8,4$ МПа)	69	165

са X70, широко применяемых для труб магист-
ральных газопроводов. Стали класса X70 отно-
сятся к ниобийсодержащим низколегированным
сталлям. Современная технология термомехани-
ческой обработки низколегированных сталей по-
вышенной прочности стала возможной в значи-
тельной мере благодаря использованию микроле-
гирующих добавок ниобия. Стали имеют пока-
затели $KCV_{-20} < 88$ Дж/см². Широкое применение
ниобийсодержащих сталей для строительства ма-
гистральных газопроводов и большой опыт их ус-
пешной эксплуатации позволили металлургам
России и Украины предложить новые стали тер-
момеханической прокатки для сварных строитель-
ных конструкций, изделий машиностроения и
других отраслей. Специально для сварных метал-
локонструкций были разработаны технические ус-
ловия ТУ 14-1-4083–86 [12] с поставкой проката
толщиной 8...50 мм из сталей 09Г2ФБ и 10Г2ФБ.
Нормативом России [2] указанные марки стали
рекомендуются для стенок нефтяных резервуаров.
Недостатком этих сталей является необходимость
во многих случаях применения предварительного
подогрева [13].

Новые возможности по повышению надежност-
и и гарантированной работоспособности резер-
вуаров открываются в связи с разработкой Укр-
госНИИКМ «Прометей» и ИЭС им. Е. О. Патона
нового ряда ниобийсодержащих сталей по ТУ У
27.1-05416923–085:2006 [14] с содержанием уг-
лерода 0,04...0,09 %. В табл. 2 приведены основ-
ные характеристики указанных сталей. При ши-
роком варьировании значений σ_T от 355 до
490 МПа и сохранении высоких показателей ра-
боты удара $KCV_{-40} = 98$ Дж/см² все стали пол-
ностью удовлетворяют требованиям табл. 1 и име-
ют критический сквозной трещиноподобный де-
фект длиной не менее 100 мм. В то же время
низкое содержание углерода в сталях позволяет
выполнять их сварку без предварительного по-
догрева кромок.

Применение для стенки резервуаров большой
вместимости (свыше 20 тыс. м³) сталей повышен-
ной и высокой прочности, вязкие свойства кото-
рых гарантируют самоторможение зародившейся
вязкой трещины до достижения критического зна-
чения, равного примерно 100 мм, поднимает на
качественно новый уровень ее надежность и при

Таблица 2. Механические характеристики сталей класса
прочности С355...С440 по ТУ У 27.1-05416923-085:2006 [14]

Марка стали, класс проч- ности	σ_T , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV_{-40} , Дж/см ²
06ГБ (355)	355	450	22	55	98
06ГБ (390)	390	490	22	55	98
06ГБ (440)	440	540	22	55	98



наличии ежедневного осмотра практически исключает возможность возникновения лавинного разрушения.

Конструкция стенки, исключая лавинные разрушения, особенно необходима для основной (внутренней) стенки двустенного резервуара. Такая конструкция позволяет отказаться от установки на ней и наружной стенке бандажей как гасителей лавинных разрушений. При ухудшении условий визуального ежедневного осмотра поверхности основной стенки, контролируемое развитие сквозного дефекта до достижения им критического значения, равного примерно 100 мм, фактически гарантирует своевременное выявление и исправление дефекта.

В Украине на сегодня имеется положительный опыт применения ниобийсодержащих сталей для стенок нефтяных резервуаров. Сталь 06Г2Б прочностью 440 МПа использовали для нижних поясов стенок двустенного резервуара вместимостью 75 тыс. м³ на ЛПДС «Броды». Сталь 10Г2ФБ успешно применяется при полной замене нижнего пояса в резервуарах вместимостью 50 тыс. м³ и для специальных вставок замены вертикальных монтажных стыков. Сварные соединения выполняли без подогрева кромок и имели ударную вязкость KCV на уровне основного металла.

Выводы

1. Благодаря разработке и освоению в Украине промышленного производства нового поколения ниобийсодержащих сталей класса прочности С355, С390 и С440, имеющих значения ударной вязкости $KCV_{40} = 98$ Дж/см², существенно повышается трещиностойкость стенки строящихся нефтяных резервуаров.

2. Исходя из критерия условия самоторможения вязкой трещины ($\delta_c = 0,17...0,18$ мм), необходимо

дополнить в действующих нормативах пункт нормирования значения ударной вязкости на поперечных образцах для листового проката нижних поясов стенки резервуаров вместимостью свыше 20 тыс. м³ не менее $KCV_{20} = 80$ Дж/см². Это требование необходимо распространить и для внутренних стенок двустенных резервуаров.

1. Nietóre problemy budowy zbiornikóv o podwojným korpusie i podwojným dnie / M. Beloev, J. Konstandinov, S. Stanceev, D. Ivanov // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. — 1996. — № 3. — S. 50–54.
2. ПБ 03-605-03. Россия. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 128 с.
3. ВВН В.2.2.28-58,2-94. Украина. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов. — 1994. — 95 с.
4. Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов. АРІ Стандарт 650. — 9-я ред. — Май, 1993.
5. Айвес, Шумейкер А. К., Мак-Кортни Р. Ф. Деформация трубопровода при распространении разрушения срезом // АОИМ. Спр. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. — 1974. — С. 73–81.
6. Шумейкер А. К., Мак-Кортни Р. Ф. Анализ перемещений при распространении разрушения срезом по трубопроводу // Там же. — 1974. — № 4. — С. 86.
7. Розентейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. — М.: Недра, 1995. — 253 с.
8. Патон Б. Е., Труфяков В. И., Кирьян В. И. Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // Автомат. сварка. — 1981. — № 12. — С. 5–9.
9. Брок Д. Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
10. Иванцов О. М., Харитонов В. И. Надежность магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1978. — 166 с.
11. Иванцов О. М. Надежность строительных конструкций магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1985. — 231 с.
12. ТУ 14-1-4083-86. Прокат листовой из ниобийсодержащих и других низколегированных сталей улучшенной свариваемости и хладостойкости. — Введ. 04.02.2007.
13. ВСН 2-124-80. Инструкция по технологии сварки магистральных трубопроводов. — М., 1981.
14. ТУ У 27.1-05416923-085:2006. Прокат листовой свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения.

The problem of improving reliability of oil storage double-wall tanks is considered. It is shown that installing special bands at lower flanges of the main and auxiliary walls does not solve the problem in its full scope. It is suggested that reliability of the main wall should be improved by applying the deformation defect tip displacement criterion K_c , which is met by the new generation of steels, i.e. controlled-rolling niobium-containing steels. Substantial improvement of toughness properties of the wall plates will guarantee detection and removal of subcritical defects in the main wall.

Поступила в редакцию 07.09.2007