



ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗЕРВУАРАМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ

В. В. КНЫШ, д-р техн. наук, **А. Ю. БАРВИНКО**, **Ю. П. БАРВИНКО**, кандидаты техн. наук,
А. Н. ЯШНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований циклической трещиностойкости образцов стыковых сварных соединений из стали 06ГБ-390 применительно к резервуарам для хранения нефти при стабильном развитии сквозной усталостной трещины, образовавшейся от поверхностного надреза по линии сплавления, с момента ее появления до достижения длины ≈ 30 мм. Крупномасштабные образцы сварных соединений с размерами $650 \times 160 \times 20$ мм испытывались при гармоническом отнулевом переменном растяжении с $\sigma_{\max} = 2/3 \sigma_T$. Показано, что применение для расчетных поясов стенки резервуаров листового проката указанной стали позволяет при использовании критерия «течи перед разрушением», исключить протяженные разрушения в сварных соединениях стенки.

Ключевые слова: усталостная трещина, развитие сквозной усталостной трещины, критерий «течь перед разрушением», циклическое нагружение

В последнее десятилетие из-за отсутствия на мировом нефтяном рынке стабильной цены на нефть во многих странах для создания необходимого запаса этого продукта строят резервуары вместимостью 50...100 тыс. м³ и более. Соответственно с каждым годом ужесточаются и требования к экологической безопасности таких сооружений. Существенно возросли нормативные требования относительно механических свойств сталей, включая и в Z направлении, к листовому прокату стенок резервуара и их сварных соединений. Однако в силу различных особенностей в сварных соединениях стенки нельзя полностью исключить дефекты, которые при ее работе в условиях циклического нагружения могут стать источником зарождения и развития усталостных вязких разрушений. При таких условиях особую актуальность приобретает задача установления долговечности стадии стабильного докритического развития образовавшейся в расчетных поясах стенки резервуаров сквозной усталостной трещины. Появление темного пятна на белой стенке от просачивающейся нефти с образовавшейся сквозной трещины может служить надежным критерием выявления трещины в тех случаях, когда время ее подрастания до критических размеров позволит гарантированно выявить трещину в условиях технического осмотра резервуаров согласно применяемым регламентам. Такой критерий выявления трещин в сосудах давления получил название «течи перед разрушением» [1].

Целью предлагаемой работы являлось экспериментальное обоснование возможности приме-

нения критерия «течи перед разрушением» к вертикальным резервуарам для хранения нефти, в которых нижние пояса изготовлены из нового класса качественной стали 06ГБ-390.

Применение для расчетных нижних поясов стенки резервуаров ниобийсодержащих сталей нового поколения 06ГБ-390; 06Г2Б-440 [2] (в дальнейшем в работе классы прочности будут опущены) с показателями ударной вязкости $KCV_{-40} \geq 120$ Дж/см² толщиной от 8 до 40 мм и мелкозернистой изотропной структурой, существенно повысило их трещиностойкость. В этом отношении представляет интерес работа [3], в которой показано, что для ряда испытанных сталей с $KCV_{-20} \geq 80$ Дж/см² наблюдается стабилизация критического раскрытия трещины в пределах $\delta_{кр} = 0,18...0,20$ мм. С учетом этого логично ожидать, что при применении для нижних поясов стенки резервуаров стали 06ГБ и возможном образовании в ней сквозной усталостной трещины скорость ее подрастания обеспечит достаточное время для обнаружения указанной трещины на докритическом этапе развития.

Как отмечалось выше, при применении критерия «течи перед разрушением» в условиях эксплуатации резервуаров важно, чтобы продолжительность стадии стабильного роста трещины на линейном (втором) участке диаграммы усталостного разрушения [4], выраженная количеством циклов заполнения — опорожнения емкости, гарантировала наличие достаточного времени для возможности обнаружения сквозной трещины по истечении из нее нефти и принятия необходимых мер безопасности. В данной работе для обоснования критерия «течи перед разрушением» применительно к стенке резервуаров для хранения нефти испытывали на усталость плоские образцы с поперечным стыковым швом (рис. 1). У образ-

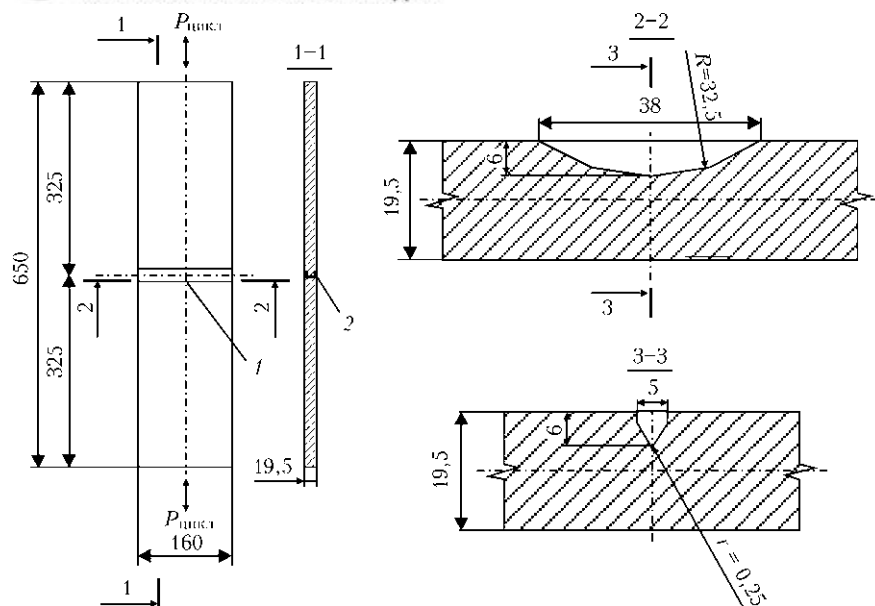


Рис. 1. Схема и размеры образцов для испытания сварных соединений стали 06ГБ на циклическую трещиностойкость: 1 — надрез в зоне сплавления; 2 — усиление шва снято с двух сторон

цов, изготовленных из листового проката стали 06ГБ, поперечное сечение с учетом снятия усиления шва, составляло 160×19,5 мм, а длина — 650 мм. Максимальное напряжение цикла гармонического нагружения принимали с учетом максимального значения расчетных кольцевых напряжений в стенке резервуаров [5], определяемых из условия

$$\sigma_k \leq R_y \gamma_c / \gamma_n,$$

где R_y — расчетное сопротивление, равное 350 МПа; γ_c — коэффициент условий работы поясов стенки, равный 0,8; γ_n — коэффициент надежности по назначению, равный 1,1.

С учетом приведенного максимальное напряжение цикла переменного нагружения образцов принято $\sigma_{\max} = 260$ МПа. Такой уровень кольцевых напряжений учитывает допуски [5] на отклонение геометрической формы стенки новых резервуаров от проектной. Учитывая, что стенка емкости представляет собой тонкостенную оболочку диаметром до 60 м и высотой до 20 м, через 15–20 лет эксплуатации нормы [6] допускают превышение первоначальных геометрических отклонений (просадка основания под стенкой, появление вмятин и др.) в два раза. Естественно, в этих условиях в отдельных областях стенки кольцевые напряжения будут существенно выше начальных значений, что учитывалось коэффициентом $\gamma_c = 0,8$, но эти напряжения не должны превышать расчетных для данной стали с учетом сроков тех-

нического обследования резервуаров. Подростание начального поверхностного надреза в образце на первом этапе до образования сквозной трещины, а затем и рост этой трещины приводит к уменьшению площади нетто-сечения образца и увеличению напряжений в образце, что в определенной мере имитирует отмеченное локальное повышение кольцевых напряжений в стенке реальных резервуаров.

Начальный трещиноподобный поверхностный надрез выполняли по центру образца, вдоль линии сплавления шва, специально заточенной фрезой. Длина полуэллиптического надреза $2a$ составляла 38 мм, а его глубина — 6 мм, радиус закругления надреза — 25 мм. Все образцы испытывали на гидропульсаторе ЦДМ 200пу при одноосном отнулевом переменном растяжении с частотой 5 Гц. Долговечность стадий образования поверхностной трещины от надреза и ее подростания по тол-

Рост длины сквозной трещины $2a$ на поверхности, противоположной надрезу, и напряжений в образцах по нетто-сечению в зависимости от количества циклов нагружения N

№ п/п	Количество циклов нагружения N	Длина сквозной трещины* $2a$, мм	Площадь ослабления образца, см ²	Площадь образца-нетто, см ²	Максимальные напряжения по нетто-сечению**, МПа
1	0	10,1	6,2	25,0	332,0
2	150	15,2	6,7	24,5	338,8
3	200	16,7	6,9	24,3	341,5
4	250	18,0	7,0	24,2	343,0
5	300	19,4	7,2	24,0	345,0
6	600	26,2	8,0	23,4	354,2
7	1400	40,0	9,5	21,7	373,0

* Длина трещины, площадь сечения и напряжения даны как среднее значение по результатам испытания шести образцов. ** Максимальное усилие циклирования 8300 кг; сквозная трещина длиной $2a$ расположена по линии сплавления сварного стыкового соединения стали 06ГБ.



щине образца до появления сквозной трещины приведены в работе [7].

Испытания образцов на усталость проводили при комнатной температуре, однако, учитывая, что листовой прокат стали 06ГБ с толщиной 8...50 мм сохраняет постоянными свои высокие пластические свойства в температурном интервале $T = +20...-40$ °С [2], можно считать, что полученные результаты испытаний корректны до температуры $T = -40$ °С. В процессе испытаний на противоположной надрезу стороне образца измеряли начальную длину образовавшейся сквозной трещины и фиксировали количество циклов, при которых она сформировалась. В дальнейшем фиксировали количество циклов при ее удлинении на каждые 3...6 мм. При длине трещины $2a \approx 40$ мм в ее вершинах появлялись пластические утяжки и испытания прекращали. Результаты усталостных испытаний образцов приведены в таблице. На рис. 2 приведена зависимость длины усталостной трещины от количества циклов переменного нагружения.

Данные таблицы показывают, что при длине трещины $2a \leq 30$ мм в нетто-сечении образца напряжения не превышали расчетного сопротивления стали 06ГБ ($R_y = 350$ МПа). При достижении трещиной длины $2a > 40$ мм в нетто-сечении образца максимальные напряжения достигали значений, близких к пределу текучести стали, т. е. появление наблюдаемых пластических утяжек при такой длине трещины не связано с предельным состоянием циклической трещиностойкости, а обусловлено ограниченными размерами образца. Такие высокие напряжения при указанной длине трещины в поясах стенки реального резервуара не будут возникать в силу многократно меньшего ослабления стенки рассматриваемым дефектом.

Использование применяемой в нормах [8] эмпирической зависимости между K_{1C} и KCV позволяет определить для данного сварного соединения критическую длину трещины $2a_{кр}$ при минимальной температуре эксплуатации резервуаров $T = -40$ °С. В соответствии с [8] $K_{1C} = 0,1 \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV_{-40}}$, МПа·√м. При $KCV_{-40} = 246$ Дж/см² для сварного шва получаем $K_{1C} = 236$ МПа·√м. При возможных повышенных кольцевых напряжениях в стенке $\sigma_k = R_y = 350$ МПа, исходя из известного соотношения для сквозной трещины критической длины $2a_{кр}$, $K_{1C} = \sigma_k \sqrt{\pi a_{кр}}$, для данного σ_k получаем значение $a_{кр} = 145$ мм и соответственно $2a_{кр} = 290$ мм. Для новых резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ в соответствии с нормами [5], кольцевые напряжения в стенке принимают равными $\sigma_k = 260$ МПа. При таких напряжениях расчетное значение критической длины трещины достигает $2a_{кр} = 520$ мм.

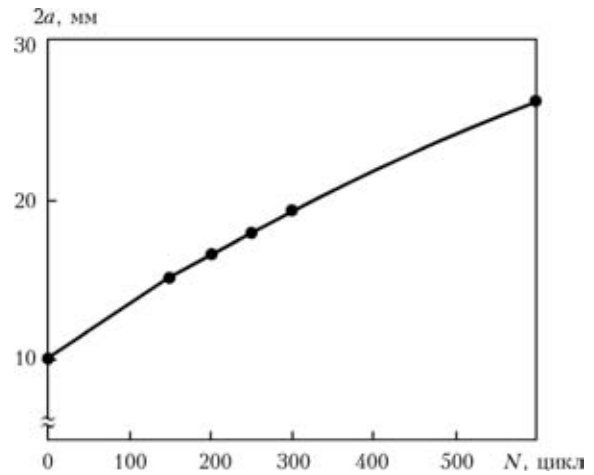


Рис. 2. Зависимость длины $2a$ сквозной трещины в зоне сплавления от количества циклов нагружения N образцов стыковых сварных соединений стали 06ГБ. Значение длины трещины $2a$ в каждой точке дано как среднее по результатам испытания шести образцов

Учитывая, что значения KCV_{-40} для основного металла и шва фактически одинаковы, полученные значения критической длины трещины можно распространить и на основной металл стенки.

Заниженное значение критической длины сквозной трещины около 30 мм, принятое при усталостных испытаниях образцов сварных соединений, которое позволяет надежно фиксировать на поверхности стенки темное нефтяное пятно, дает десятикратный запас относительно реальной критической длины трещины резервуаров примерно 300 мм.

Из рис. 2 видно, что при устойчивом стабильном развитии сквозной усталостной трещины в образцах зависимость ее длины от количества циклов нагружения близка к линейной. На протяжении первых 300 циклов нагружения наблюдается стабильное ее развитие до длины 20,0 мм. При последующих 300 циклах длина трещины увеличивается всего на 6 мм. Длина трещины, соответствующая 300 циклам нагружения, имеет важное практическое значение, поскольку данное количество циклов нагружения (слива-налива нефти) соответствует одному году эксплуатации резервуаров на отдельных нефтепарках с самым высоким оборотом нефти [9]. На обычных нефтепарках этот показатель не превышает 100...120 в год.

Применительно к эксплуатируемым резервуарам полученные при испытании образцов результаты должны быть скорректированы коэффициентом запаса по количеству циклов нагружения. Эта корректировка необходима для учета масштабного фактора касательно возможного наличия не выявленных дефектов, имеющихся в реальных резервуарах. В работе [10] на основании обобщения исследований по широкой экспериментальной программе натуральных усталостных испытаний сосудов давления предлагается принимать коэффициент запаса по количеству циклов равным 20.



В нашем случае это означает, что в реальности будет гарантировано время для обнаружения на стенке пятна вытекающей нефти, соответствующее выполнению пятнадцати (300:20) циклов слива-налива нефти. Для нефтепарков с обычным режимом эксплуатации это составляет один месяц, а при усиленном режиме не менее двух недель эксплуатации. При наличии в соответствии с правилами эксплуатации резервуаров обязательного ежедневного визуального осмотра поверхности стенки емкостей данного времени вполне достаточно для гарантированного обнаружения по критерию «течи перед разрушением» появившегося дефекта и принятия мер по его ремонту. Период стабильного подрастания трещины при последующих циклах нагружения от 300 до 600 может рассматриваться как гарантия безопасного обнаружения трещины при форс-мажорных обстоятельствах.

Гарантированное выявление усталостных трещин на этапе их стабильного развития исключает возможность разрушения расчетных поясов стенки как по основному металлу, так и по сварным соединениям. Поэтому при расчетах резервуаров необходимо прежде всего обеспечить условия исключения локальных (местных) разрушений основной стенки, днища, арматуры и узлов патрубков. Главной задачей при расчете основной стенки резервуара становится обеспечение ее статической прочности. Исключение образования на ее поверхности протяженных разрушений будет обеспечиваться применением критерия «течи перед разрушением» при условии использования для стенки сталей, имеющих группу стойкости к слоистым разрушениям Z 35 и ударную вязкость $KCV \geq 80$ Дж/см² при минимальной температуре эксплуатации емкостей. Как пример, таким требованиям отвечает сталь 06ГБ. При наличии основной стенки с применением данной стали защитная стенка будет только локализовывать в своих пределах возможный разлив нефти, подвергаясь при этом статическому нагружению.

Предложенный подход исключает необходимость устройства на основной стенке дополнительных конструкций в виде бандажей или других решений, как инструмента остановки протяженных разрушений, а на защитной — специальных колец жесткости для сохранения геометрической формы стенки.

Исключение протяженных разрушений на стенке резервуаров путем применения листового проката новых сталей с указанными выше механическими свойствами и обоснованного использования критерия «течи перед разрушением» не снимает требований высокого качества листового проката и его сварных соединений. Получение для новых сталей сварных соединений с механическими свойствами не ниже свойств основного ме-

талла и исключение образования в них холодных трещин требует специальных технологий сварки и повышенного по сравнению с требованием норм на резервуары [11] объема контроля их качества.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной публикации и в работе [12], успешно реализованы при проектировании и строительстве двух резервуаров с защитной стенкой вместимостью по 50 тыс. м³ на нефтеперекачивающей станции «Мозырь» (Республика Беларусь). Монтажные и сварочные работы при строительстве данных резервуаров выполняли под авторским надзором специалистов ИЭС им. Е. О. Патона.

Выводы

1. Показано, что долговечность стадии стабильного докритического развития образовавшейся сквозной усталостной трещины превышает 300 циклов нагружения. С учетом принятого для сосудов давления коэффициента запаса по количеству циклов нагружения равного 20 указанная долговечность обеспечивает минимум две недели безопасной эксплуатации резервуара для хранения нефти. При осуществлении в соответствии с правилами эксплуатации резервуаров обязательного ежедневного визуального осмотра поверхности стенки емкостей данного времени достаточно для гарантированного обнаружения появившегося дефекта по критерию «течи перед разрушением» и принятия мер по его ремонту.

2. Выполнение расчетных поясов стенки резервуаров из стали 06ГБ с толщиной до 30 мм при использовании критерия «течи перед разрушением» позволяет исключить протяженные разрушения в сварных соединениях стенки и устранить возможность появления потока изливающейся нефти с высокой кинетической энергией. В этой связи нет необходимости в устройстве на основной стенке резервуара дополнительных конструкций в виде бандажей, а на защитной стенке — специальных колец жесткости для сохранения геометрической формы стенки.

1. Броек Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
2. ТУ У 27.1-05416923-085:2006. Прокат листовой, свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения. — Введ. 02.04.2007.
3. 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. — 1982. — № 12. — С. 5–9.
4. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления. — Л.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
5. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 85 с.
6. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 85 с.



7. *Развитие* поверхностного трещиноподобного дефекта в сварном соединении стали 06ГБ-390 при циклическом нагружении / А. Ю. Барвинко, В. В. Кныш, Ю. П. Барвинко, А. Н. Яшник // Автомат. сварка. — 2012. — № 4. — С. 48–51.
8. *ВБН В.2.3-00018201.04-2000*. Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами. — Киев, 2000. — 25 с.
9. *РД 16.01-60.3000-КТН-026-1-04*. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000...50000 м³. — М.: АК «Транснефть», 2004. — 71 с.
10. *Никольс Р.* Конструирование и технология изготовления сосудов давления. — М.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
11. *ГОСТ 31385-2008*. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. — М., 2009. — 109 с.
12. *Хладостойкость* и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390 / В. Д. Позняков, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 3. — С. 5–7.

The paper gives the results of experimental studies of cyclic crack resistance of samples of butt welded joints on 06GB-390 steel in the case of oil storage tanks at stable development of a through-thickness crack, initiating from the notch surface along the fusion line, from the moment of its initiation up to reaching the length of ~ 30 mm. Large-scale samples of welded joints of 650×160×20 mm dimensions were tested at harmonic alternating zero-to-tension stress cycle with $\sigma_{\max} = 2/3 \sim \sigma_y$. It is shown that application of rolled sheets of the mentioned steel for design rings of tank wall allows, when using the "leak-before-break" criterion, eliminating extended fractures in the wall welded joints.

Поступила в редакцию 06.04.2012

МЕЛКОПОЛЮСНЫЙ ВЕРХНИЙ БЛОК МАГНИТНОЙ ПЛИТЫ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ АВТОВАКУУМНОЙ ПАЙКИ

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработан технологический процесс изготовления мелкополосных верхних блоков магнитной плиты, основанный на высокотемпературной автовакуумной пайке.

Технологический процесс, рассчитанный на изготовление блоков любой формы (прямоугольной, круглой) и размеров, не требует применения специального оборудования, дорогих припоев и наряду с этим обеспечивает высокое качество изделий.

Мелкополосные блоки, предназначенные для закрепления мелких и тонких деталей на магнитных станочных приспособлениях, позволяют равномерно распределить силу магнитного крепления по всей рабочей поверхности. Минимальная сила притяжения при полной загрузке детали диаметром 10 мм составляет 50 Н/см², что дает возможность производить обработку на форсированных режимах.

При использовании технологии автовакуумной пайки можно получать монолитные, герметичные, жесткие блоки с любой степенью магнитной неоднородности.

Так, многослойный блок длиной 1250 мм в процессе эксплуатации деформируется не более чем на 2 мкм, т. е. ведет себя как однородный листовый материал, благодаря чему удается достичь высокой точности обработки.

Изготовление мелкополосных блоков методом автовакуумной пайки не требует использования драгоценных и дорогостоящих материалов, в качестве припоя применяются сплавы на медной, марганцевой или никель-марганцевой основе.

Оптимальное соотношение толщины магнитных и немагнитных элементов, соединенных автовакуумной пайкой, повышает КПД блоков на 30...40 % по сравнению с известными.

