



РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛИ 06ГБ-390 ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

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

Приведены результаты экспериментальных исследований развития поверхностного трещиноподобного дефекта в сварном стыковом соединении на плоских образцах стали 06ГБ-390 в условиях циклического нагружения до образования сквозной трещины. Применительно к расчетным поясам стенки резервуаров для хранения нефти установлена зависимость подрастания в вертикальных стыковых сварных соединениях стенки поверхностного трещиноподобного дефекта от количества циклов нагружения. Показано, что применение листового проката из стали 06ГБ-390 для расчетных поясов стенки резервуаров существенно повышает безопасность их эксплуатации при наличии поверхностных дефектов в сварных соединениях.

Ключевые слова: дуговая сварка, стыковые сварные соединения, поверхностный трещиноподобный дефект, циклическое нагружение, зарождение усталостной трещины, развитие трещины, толщина стенки резервуара

Эксплуатация резервуаров для хранения нефти с одной и двумя стенками (основной и защитной) предусматривает ежедневный визуальный осмотр их поверхностей с констатацией факта наличия или отсутствия на них визуально обнаруживаемых поверхностных трещин или нефтяных пятен от просачивающейся через сквозные трещины нефти. Появление следов нефти на поверхности стенки является результатом конечного этапа развития поверхностного или внутреннего трещиноподобного дефекта. Поверхностная трещина после подрастания и выхода на противоположную поверхность стенки резервуара является наиболее опасным дефектом. Поэтому определение количества циклов слива-налива нефти в резервуар при принятом режиме его эксплуатации, что приводит к образованию сквозной трещины, является актуальной задачей как для обычных резервуаров с одной стенкой, так и для двустенных. Установленная циклическая долговечность сварных соединений стенок резервуаров с рассматриваемым поверхностным дефектом позволяет уточнить время их ремонта и предотвратить дальнейшее развитие сквозной трещины. Исследования циклической долговечности подрастания поверхностной трещины, включая ее выход на противоположную поверхность образца, является первым этапом. Они продиктованы применением в последние годы для резервуаров вместимостью $V = 50 \dots 75$ тыс. м³ новых сталей класса прочности С440, С390 и С350 [1], которые отличаются от рекомендуемых нормативным документом [2, 3]

низким содержанием углерода и серы, а также механическими свойствами (пластичностью, хладостойкостью, KCV), значительно превышающими существующие требования [2, 3].

Отметим, что в нормативных документах [2, 3] в числе рекомендуемых для стенок резервуаров сталей фактически не представлены стали класса С390 с толщиной 10...30 мм, требуемой ударной вязкостью $KCV \geq 50$ Дж/см² при температуре $T = -20 \dots 40$ °С. Эту нишу заполняют стали нового поколения 06ГБ-390 и 09Г2СЮч-У [1, 4] (далее в марке стали 06ГБ-390 класс прочности будет опускаться). Листовой прокат из стали 06ГБ успешно прошел апробацию при строительстве четырех резервуаров вместимостью $V = 50$ тыс. м³ на ЛПДС «Мозырь» (Республика Беларусь). Сталь толщиной 8...50 мм имеет $KCV > 118$ Дж/см² при $T = +20 \dots -40$ °С [1]. Температура $T = -40$ °С является минимальной расчетной для всех стран СНГ и Европы. Поскольку результаты испытаний образцов при $T = +20$ и -40 °С находятся на верхнем участке кривой зависимости KCV от температуры испытаний, то данные, полученные при $T = +20$ °С, распространяются на все верхнее плато этой кривой.

На рис. 1 представлены схема и размеры испытываемых образцов сварных соединений с трещиноподобным надрезом. Технология сварки листового проката стали 06ГБ, разработанная ИЭС им. Е. О. Патона, обеспечивает равнопрочность сварного соединения с основным металлом [5]. Поперечный стыковой шов имел полное проплавление по толщине. Механические свойства листового проката стали 06ГБ, полученные на трех образцах, следующие: толщина $\delta = 20$ мм; предел текучести $\sigma_T = 387,4$ МПа/мм²; временное сопро-

тивление $\sigma_B = 477,9$ МПа/мм²; относительное удлинение $\delta_5 = 35,6$ %; относительное сужение $\psi_z = 79,6$ %; ударная вязкость $KCV_{-40} = 232$ Дж/см²; $\sigma_T/\sigma_B = 0,81$.

При испытании сварных соединений на статический разрыв разрушения происходили по основному металлу. По линии сплавления KCV_{-40} металла сварного соединения составляла 341,1 Дж/см² (среднее по трем образцам).

Надрез в сварных образцах наносили по линии сплавления фрезой с радиусом закругления $r = 0,25$ мм, глубина его составляла 6 мм, а длина — 39 мм (рис. 1). Всего испытано девять образцов, семь — из стали 06ГБ. Три из них перед испытанием подвергали предварительному растяжению до получения остаточной деформации $\delta_{ост} = 0,8...1,0$ %. Для сравнения два образца изготовили из стали 09Г2С-12 с содержанием 0,01 мас. %S и 0,013 мас. % P.

Образцы испытывали при гармоническом циклическом нагружении $P_{цикл}$ на пульсаторе ЦДМ-200пу с частотой 5 Гц. Максимальное напряжение цикла составляло $\sigma_{max} = 2/3\sigma_T$, что соответствует значениям максимальных кольцевых напряжений в стенке резервуара, а минимальное — $\sigma_{min} = 0,1\sigma_{max}$. Поперечное сечение образцов из стали 06ГБ принято 160×20 мм, а из стали 09Г2С-12 — 160×16 мм. Размеры образцов и максимальные напряжения при циклическом нагружении позволяли проводить испытание на трещиностойкость сварных соединений с развитием поверхностного трещиноподобного надреза в условиях плоского деформированного состояния до образования на противоположной поверхности образца сквозной трещины и ее развития до длины $l = 2a$ (30...40 мм). Принятые размеры начального надреза

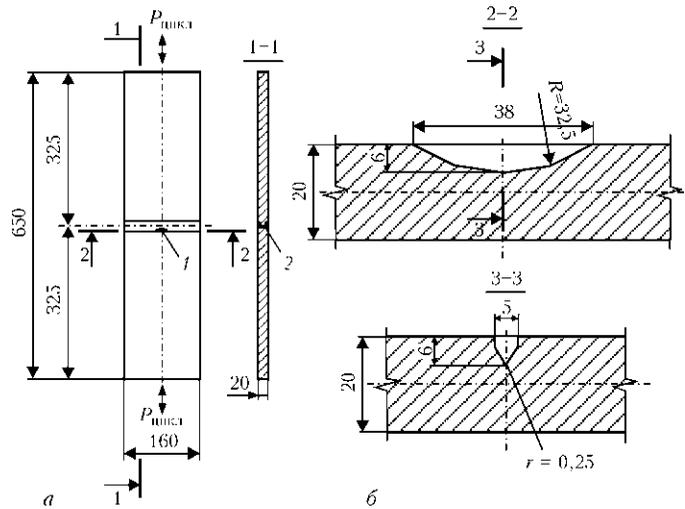


Рис. 1. Схема (а) и размеры (б) образцов сварных соединений стали 06ГБ для испытания на циклическую трещиностойкость: 1 — надрез по линии сплавления в ЗТВ; 2 — усиление шва снято с двух сторон

реза близки к визуально выявляемым трещинам в вертикальных сварных соединениях стенки резервуаров вместимостью $V = 10, 20$ и 50 тыс. м³. На первом этапе испытаний определяли количество циклов нагружения, отвечающее моменту образования усталостной трещины по всему фронту надреза, и выявляли последовательность процесса ее развития от надреза до выхода на противоположную поверхность образца. Схема образования сквозной трещины приведена на рис. 2. Результаты испытаний образцов представлены в таблице.

На четырех образцах, которые испытывали без предварительного растяжения, среднее количество циклов до зарождения трещины по всей длине надреза составило 14,5 тыс. Испытание двух образцов (№ 6, 7) при начальной остаточной деформации растяжения $\delta_{ост} = 0,8...1,0$ % показало уве-

Результаты испытаний образцов с начальным поверхностным надрезом по линии сплавления ЗТВ сварного соединения сталей 06ГБ и 09Г2С-12

№ образца	Марка стали	Состояние сварного соединения	Количество циклов к моменту зарождения трещины по всему фронту надреза, тыс.	Начальная длина трещины на поверхности образца, мм	Количество циклов от зарождения трещины по всему фронту надреза до образования сквозной трещины, тыс.	Длина трещины со стороны надреза при образовании сквозной трещины, мм	Длина сквозной трещины при выходе ее на противоположную поверхность, мм
1	06ГБ	После сварки в свободном состоянии	16,9	42	13,4	59	15
2			12,6	40	10,0	56	10
3			14,2	42	12,8	56	10
4			14,2	40	10,0	57	10
5	06ГБ	Предварительное удлинение образца до 0,8...1,0 % при остаточной деформации	9,9	40	7,9	59	10
6			20,0	40	7,2	59	10
7			18,2	41	10,9	58	11
8	09Г2С-12	После сварки в свободном состоянии	20,4	41	13,6	54	12
9			49,2	41	13,3	49	8

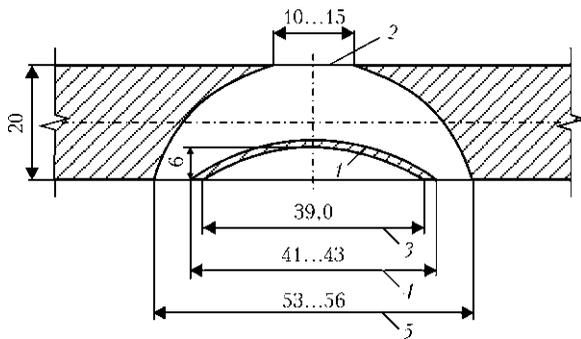


Рис. 2. Схема образования начальной трещины от надреза и ее подрастание до сквозной трещины с выходом на противоположную поверхность образца: 1 — начальная сквозная трещина; 2 — исходный надрез; 3 — длина трещиноподобного механического надреза; 4 — длина исходной трещины; 5 — длина трещины при ее подрастании до сквозной трещины

личение количества циклов до зарождения трещины по всему фронту надреза почти на 30 %. Такой результат получен вследствие уменьшения остроты надреза при предварительном растяжении образцов до их пластического деформирования. Подрастание трещины на образце № 5 можно рассматривать как результат отклонения надреза от линии сплавления или отсутствия четкой линии сплавления по толщине образца. После образования на образцах по всему фронту надреза усталостной трещины коэффициент концентрации напряжений в их вершинах стал одинаковым. В этих условиях количество циклов нагружений у образцов № 1–7 до выхода усталостной трещины на противоположную поверхность образца (с учетом разброса) фактически было одинаковым и составляло в среднем $N = 10,3$ тыс. Одинаковую длину на всех образцах имеют трещины на поверхности надреза и на противоположной стороне. Процесс образования усталостной трещины и ее подрастание до выхода на противоположную поверхность хорошо иллюстрирует рис. 3. Симметрия излома нарушена наличием дефекта в шве (несплавление с правой стороны). На рис. 3 видно, что вначале усталостная трещина образуется глубиной около 5 мм по всему фронту надреза, а затем она развивается по толщине образца с выходом на противоположную его поверхность (ее начальная длина составляет 10...5 мм).

Результаты испытания образцов из стали 09Г2С-12 подтвердили известные данные о том, что стали с развитой площадкой текучести имеют высокую сопротивляемость против зарождения и развития усталостных трещин [6, 7]. Однако низкая хладостойкость (по значению ударной вязкости) указанных сталей существенно ограничивает их использование в конструкциях, работающих в условиях низкой температуры.

Для практического применения важно знать количество циклов нагружения стенки резервуаров, время зарождения усталостной трещины от

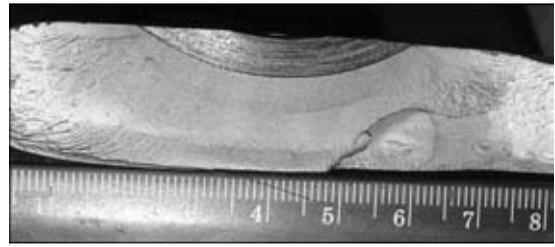


Рис. 3. Вид поверхности усталостной сквозной трещины (образец № 1)

имеющегося поверхностного трещиноподобного дефекта (надреза) и ее подрастания по толщине образца до образования сквозной трещины. При этом рассматривали результаты испытания только образцов № 1–4, не имеющих смятения остроты надреза. Среднее количество циклов составило 14,5 и 10,3 тыс. Для реальных конструкций оценка полученных на образцах результатов выполнена с учетом коэффициента запаса на количество циклов нагружения. Межгосударственным исследовательским комитетом по сосудам давления данный коэффициент рекомендуется принимать равным 20 [8]. Тогда реальное количество циклов нагружения до образования усталостной трещины составляет 725, а до ее подрастания с образованием сквозной трещины — 515 циклов. Полученные данные показывают, что при применении для расчетных поясов стенки резервуаров стали 06ГБ и количестве циклов нагружения 120 в год (режим эксплуатации большинства резервуарных нефтепарков) зарождение усталостной трещины от имеющегося на поверхности стенки поверхностного острого надреза длиной 40 мм можно ожидать через 6 лет. Процесс перехода образовавшейся усталостной трещины в сквозную при толщине стенки резервуара 20 мм происходит за четыре года эксплуатации. Полученные данные хорошо согласуются с нормативным документом [9], по которому предусмотрено выполнять частичное обследование новых резервуаров через пять лет (после 20 лет эксплуатации — через четыре года) и полное обследование соответственно через десять и восемь лет. Такие сроки позволяют при частичном обследовании визуально определить наличие образовавшегося на стенке поверхностного дефекта, а в случае развития из него усталостной трещины выявить ее ультразвуковым контролем при полном очередном обследовании резервуара.

Таким образом, представленные результаты дают оценку только процесса зарождения усталостной трещины от поверхностного дефекта и ее подрастания по толщине образцов до выхода на противоположную его поверхность. Однако зарождение усталостной трещины может быть и от внутренних трещиноподобных дефектов (несплавления по кромкам, различных плоских включений и пр.) или поверхностного дефекта, расположенного на внутренней поверхности стенки ре-

резервуара. В этом случае поверхностная трещина проявит себя уже на стадии сквозной. Эта часть исследований является вторым этапом работы, в которой будет изучен процесс развития сквозной усталостной трещины на начальном участке диаграммы усталостного развития [8] по линии сплавления сварного соединения стали 06ГБ толщиной 20 мм применительно к стенке резервуаров для хранения нефти. Результаты этих исследований будут опубликованы в одном из последующих номеров журнала.

Выводы

1. Сварные стыковые соединения листового проката стали 06ГБ применительно к стенке резервуаров для хранения нефти имеют высокую стойкость против развития от поверхностных острых дефектов усталостной трещины в направлении толщины листа при циклическом нагружении в условиях плоской деформации.

2. Принятые в нормативных документах сроки частичного и полного обследования резервуаров из стали 06ГБ позволяют выявлять на их стенках поверхностные острые дефекты до зарождения от них усталостной трещины, а в случае ее зарождения

принимать необходимые меры безопасности и устранять выявленные дефекты.

1. ТУ У 27.1-05418923-085:2008. Прокат листовой свариваемый из качественной стали классов прочности 355–590 для машиностроения. — Введ. 28.12.2006.
2. ГОСТ 31385–2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. — Введ. 02.06.2009.
3. ПБ 03-605–03. Правила устройства вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — Введ. 09.06.2003.
4. ТУ 14-1-5065–2006. Изменения № 1. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч, 09Г2СЮч-У, 09ХГ2СЮч и 09ХГ2СЮс-У. — Введ. 27.12.2011.
5. 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. 45–49.
6. Новиков В. И., Гиренко В. С., Бернацкий А. В. Анизотропия свойств металлопроката и работоспособность сварных конструкций // Там же. — 1985. — № 12. — С. 13–19.
7. Никифорчин Г. Н., Студент А. З. Использование нелинейной механики разрушения для оценки сопротивления росту коррозионных трещин // Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 258–262.
8. Никольс Р. В. Конструирование и технология изготовления сосудов давления. — М.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
9. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів. — Чинний з 2009 р.

The paper presents results of experimental studies on development of a surface crack-like defect in a butt welded joint on flat specimens of steel 06GB-390 under cyclic loading conditions to formation of a through crack. The dependence of growth of the surface crack-like defect in vertical butt joints on the loading cycle quantity was established for design rings on oil storage tank walls. It is shown that in the presence of surface defects in the welded joints the use of rolled plates of steel 06GB-390 for the design rings of the tank walls provides a substantial improvement of their operational safety.

Поступила в редакцию 21.02.2012,
в окончательном варианте 05.03.2012

Научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ, ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

К 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники,
проф. Д. М. Рабкина и д-ра техн. наук, проф. И. И. Фрумина

25-26 октября 2012

г. Киев
ИЭС им. Е. О. Патона

Организаторы конференции: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Общество сварщиков Украины

Контакты: (044) 200 54 06; 200 63 57; 200 24 66; 200 82 77
E-mail: office@paton.kiev.ua; tzu@e-mail.ua