

## ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ «УТЕЧКА ДО РАЗРУШЕНИЯ» ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЛАВИННОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕНКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

А. Ю. БАРВИНКО, Ю. П. БАРВИНКО, А. Н. ЯШНИК, В. Н. МИРЯНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрена возможность повышения работоспособности резервуаров для хранения нефти вместимостью 50...120 тыс. м<sup>3</sup> путем применения для расчетных поясов стенки нормализованной листовой стали 09Г2СЮч-У390 и 09ХГ2СЮч-У440. Экспериментально в условиях плоской деформации на начальном этапе развития сквозной трещины установлена связь между длиной сквозной усталостной трещины в сварном стыковом соединении исследуемой стали и количеством циклов нагружения емкости. На основании полученной связи установлено, что после образования в сварном соединении стенки сквозной трещины и появления утечки нефти есть достаточное время и условия для ее визуального обнаружения и принятия мер по устранению выявленного дефекта. Возможность применения данного способа обнаружения сквозной трещины является доказательством того, что резервуары с расчетными поясами из исследуемой стали удовлетворяют критерию утечки до разрушения. Библиогр. 19, табл. 5, рис. 4.

*Ключевые слова:* резервуары хранения нефти, усталостная трещина, циклическое нагружение, стыковое сварное соединение, лавинное разрушение, критерий утечки до разрушения

Развитие промышленного производства требует постоянного повышения внимания к охране окружающей среды. В данной публикации на примере строительства резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов ( $V = 50...120$  тыс. м<sup>3</sup>) показана возможность повышения экологической безопасности данных объектов путем предупреждения развития лавинных разрушений в сварных соединениях стенки в случае применения для расчетных поясов нормализованной листовой стали класса прочности С390, С440 с пониженным содержанием углерода. В соответствии с нормами Украины [1], указанные объекты относятся к высшему классу последствий ответственности ССЗ, что учитывается введением в условие прочности коэффициента надежности  $\gamma_n = 1,25$ . Наряду с повышением прочности ужесточены нормы учета сейсмического воздействия при строительстве новых объектов. В нормах [2] некоторые районы Карпат и Одесской области имеют сейсмичность 8-9 баллов при средней (второй) категории грунтов на площадке строительства и, соответственно, на один балл выше при более высокой категории. Наряду с приведенными положениями в стандарте [3] введено дополнительное требование для резервуаров с защитной стенкой: конструкция стенки рабочего резервуара должна предотвращать возможность ее лавинного разрушения. Повышены требования к качеству листового проката и его сварных соединений. В конечном итоге принятые изменения и дополнения к нормативным актам направлены на обеспечение нормативной работоспособности

и экологической безопасности сооруженных резервуаров на протяжении всего расчетного срока их службы. В достижении поставленных требований одним из основных вопросов является обеспечение высокой работоспособности сварных стыковых соединений стенки.

В последние годы разработаны и освоены в промышленном производстве новые качественные нормализованные стали класса прочности С390 и С440 для ответственных строительных конструкций. Выполненная в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) оценка соответствия их механических характеристик требованиям действующих стандартов по созданию резервуаров позволила найти и предложить новые подходы к решению ряда вопросов по повышению работоспособности стенки. В табл. 1 приведены основные характеристики листового проката толщиной 16...40 мм, класса прочности 390–440, рекомендуемого стандартами США, ЕС, Украины [3–6] для основных металлоконструкций резервуаров вместимостью 20...120 тыс. м<sup>3</sup>. Там же приведены основные требования стандартов к листовой стали: состояние поставки листа, содержание углерода, ударная вязкость  $KCV_{40}$ , соотношение  $\sigma_T/\sigma_B$ .

Из данных таблицы видно, что в стандарте API 650[4] представлены две стали: А537 и А678 с поставкой листа закалка-отпуск (ЗО). Стали удовлетворяют всем предъявляемым требованиям, за исключением довольно высокого содержания углерода: 0,24; 0,20 %. Евростандарт представ-

Таблица 1. Рекомендуемые марки стали для основных металлоконструкций резервуаров большой вместимости согласно стандартам США, ЕС, Украины

Наименование стандарта на проектирование резервуаров (страна действия)	Обозначение рекомендуемой стали, толщина листа	Нормативный документ на поставку стали	Состояние поставки*	Содерж. углерода, %, (max)	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{5\%}$ , %	KCV согласно нормативного документа на поставку стали, Дж/см <sup>2</sup> /T <sub>исп</sub> , °C	$\sigma_T/\sigma_B$
API 650 11-е издание (США)	A537M класс 2, C415, $t \leq 45$ мм	Спецификация ASTM A537/ A537M	3/O	0,24	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
	A678M марка B, C415, $t \leq 45$ мм	Спецификация ASTM A678/ A678M	3/O	0,20	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
	A841M марка B класс 2, C415, $t \leq 40$ мм	Спецификация ASTM A841/ A841M	TMCP	0,15	415	550...690	22	34/-68	0,75...0,60
EN 1993-4-2:2007 EN 14015:2004 (страны ЕС)	EN 10025-3-S420N, C420, $16 < t \leq 40$ мм	EN 10025-3:2004	H	0,22	420 400	520...680	19	25/-20	0,81...0,62
	EN 10025-3-S420NL, C420, $16 < t \leq 40$ мм	EN 10025-3:2004	H	0,22	420 400	520...680	19	34/-20 25/-40 20/-50	0,81...0,62
Стали, которые не вошли в перечень рекомендуемых, но применяются при строительстве резервуаров	18G2AV/E440R-N C440, $16 < t \leq 30$ мм	PN- 86/H-84018	BO, H	0,20	430	560...720	18	83/-40 – данные заводских серти- фикатов	0,77...0,60
	06ГБ C390, $8 < t \leq 50$ мм	ТУ У 27.1- 05416923- 085:2006	BO, 3/O	0,08	390	490	22	123/-40 98/-60	0,80
	06Г2Б C440, $8 < t \leq 50$ мм			0,08	440	540	22	74/-70	0,81
	09Г2СЮч-У C390, $8 < t \leq 50$ мм	ТУ 14-1- 5065:2006 Изменение №1 от 01.03.2012г.	BO, H	0,13	390	530	18	60/-40 30/-70	0,74
	09ХГ2СЮч-У C440, $20 < t \leq 32$ мм C440, $32 < t \leq 60$ мм			0,11	440 410	590 570	18	60/-40 30/-70	0,75 0,72

\* Условные обозначения состояния поставки стали: 3/O — закалка с отпуском; BO — внепечная обработка; TMCP — термомеханическая контролируемая прокатка; 3/BO — закалка с высоким отпуском; H — нормализация; ТУ — термическое упрочнение.

лен сталями после нормализующего проката S420 и S460 [5] с содержанием углерода 0,18...0,22 % и соотношением  $\sigma_T/\sigma_B$  равным 0,81...0,62, при норме не более 0,75 [3]. Приведен в таблице и пример применения для стенки резервуаров вместимостью 75 тыс. м<sup>3</sup> нормализованной стали 18G2AV/E440R-N, улучшенной внепечной обработкой (BO) [7]. После улучшения показатели  $KCV_{40}$  составили не менее 96 Дж/см<sup>2</sup>, что почти в два раза больше исходных значений. Украина представлена листовым прокатом 06ГБ с  $\sigma_T/\sigma_B = 0,90...0,85$ , поставка 3O и двумя нормализованными сталями 09Г2СЮч-У390 и 09ХГ2СЮч-У440 [8] с содержанием углерода 0,11...0,13 % и соотношением  $\sigma_T/\sigma_B$  не более 0,75.

Стали 09Г2СЮч и 09ХГ2СЮч [9] были разработаны в 1982–1984 гг. по инициативе ИЭС им. Е. О. Патона, совместно с металлургическими комбинатами «Азовсталь» (Украина) и «Северсталь» (Россия). На первом этапе разрабатывалась листовая сталь 09Г2СЮч. По свойствам

она должна была соответствовать сталям общего назначения и быть альтернативой сталям 09Г2С, 16ГС, 20К при производстве сосудов высокого давления. Основными требованиями к новой стали были повышенная прочность (класс 390), высокая хладостойкость ( $KCV_{40} \geq 60$  Дж/см<sup>2</sup>), низкая чувствительность к перегреву при электрошлаковой сварке листов толщиной 40...120 мм. В основу разработки новой стали была положена низколегированная сталь массового назначения 09Г2С. Достоинства новой стали обеспечивались оптимальным ее легированием и технологией производства: повышенное содержание марганца, дополнительное легирование алюминием и церием в сочетании с внепечной обработкой. Процесс разработки новой стали, технология ее получения и результаты успешного применения для изготовления сварных сосудов высокого давления толщиной 40...110 мм довольно полно изложены разработчиками стали в работе [10]. Достигнутый положительный эф-

фект применения стали 09Г2СЮч позволил ее авторам в дальнейшем путем дополнительного легирования введением в сталь примерно 1 % хрома оптимизировать ее состав. Была получена новая сталь 09ХГ2СЮч класса прочности С440 [11]. Увеличение в стали хрома существенно увеличило ударную вязкость, повысило прочность стали и ее хладостойкость в зоне термического влияния (ЗТВ) при электрошлаковой сварке, что позволило заменить послесварочную нормализацию сосудов высоким отпуском [10, 11]. Новые стали в улучшенном варианте получили обозначение 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У, класс прочности 390 и 440 и выпускались по ТУ [9]. В 2011 г., по инициативе ИЭС им. Е. О. Патона и ФГУП «ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина» было разработано Изменение № 1 к данным техническим условиям, что позволило получить механические свойства сталей [8] в полном соответствии с требованиями стандартов [3–5] на резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов.

В работе [12] показано, что высокие пластические свойства листовой нормализованной стали 09Г2СЮч-У дают возможность отказаться от высокого отпуска узлов врезки патрубков и люков при толщине стенки резервуара до 30 мм и выявлять усталостные сквозные трещины на начальном этапе их развития с применением критерия утечки до разрушения. В данной публикации на основании результатов выполненных экспериментальных исследований сварных соединений нормализованной листовой стали 09ХГ2СЮч-У, включая основной металл, показано, что аналогичные возможности имеются и в стенке резервуаров при применении для расчетных поясов данной стали.

В Украине производство сталей по техническим условиям [8] освоено МК «Азовсталь», а разработанная в ИЭС технология сварки обеспечивает их механические свойства на уровне основного металла. Нормативные значения ударной вязкости листового проката  $KCV_{-40} \geq 60$  Дж/см<sup>2</sup> для толщины 20...32 мм. При поставке листов  $t = 26$  мм ста-

ли 09Г2СЮч-У на два резервуара вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> сертификатные данные  $KCV_{-40}$  были не ниже 148 Дж/см<sup>2</sup>.

Необходимость дополнительных технических предложений для гарантированного предотвращения лавинных разрушений сварных соединений стенки внутреннего резервуара (для емкостей с защитной стенкой) в стандарте [3] — это следствие возникшей необходимости строительства значительного числа таких резервуаров вместимостью 50...100 тыс. м<sup>3</sup>. Отказ от обвалования вокруг резервуаров при отсутствии фактических данных о выполнении этой функции защитной стенкой привел к необходимости предусматривать дополнительные мероприятия по повышению работоспособности стенки основного (внутреннего) резервуара. С учетом новых требований нормативных документов в настоящей работе представлен анализ результатов выполненных в ИЭС исследований о возможности предупреждения лавинных разрушений путем применения критерия «утечки до разрушения» для расчетных поясов стенки резервуаров вместимостью 20...120 тыс. м<sup>3</sup> при использовании листового нормализованного проката стали 09ХГ2СЮч-У.

Теоретические основы возможности исключения лавинного разрушения стенки в металлических емкостях для хранения жидкости по ее истечению из образовавшейся трещины приведены в [13], а обзор состояния данного вопроса на сегодня в [14]. В работе [13] рассмотрена усталостная поверхностная трещина длиной примерно  $2t$ , которая в процессе циклического нагружения растет и выходит на противоположную сторону стенки. Через сквозную трещину образуется утечка хранимой жидкости, которая позволяет визуально обнаружить дефект. Важно, чтобы до достижения образовавшейся сквозной трещиной своего критического размера было достаточно времени ее обнаружить и принять меры по устранению выявленного дефекта, т. е. предотвратить лавинное разрушение. Такое исключение лавинного разрушения получило название «по критерию утечки до разрушения». В работе [14] отмечено, что лите-

Т а б л и ц а 2. Химический состав исследуемой стали 09ХГ2СЮч-У, мас. %

Марка стали	С	Si	Mn	Cr	Al	S	P	Cu	Ni
						не более			
09ХГ2СЮч-У ТУ 14-1-5065-2006 (изменение № 1)	0,10...0,13	0,50...0,80	1,9...2,2	1,0...1,30	0,04...0,08	0,030	0,030	0,30	0,30
09ХГ2СЮч-У (исследуемая)	0,10	0,50	1,84	0,96	0,03	0,002	0,002	0,05	0,12
09Г2СЮч-У ТУ 14-1-5065-2006 (изменение № 1)	0,08...0,11	0,30...0,60	1,9...2,2	Не более 0,30	0,04...0,08	0,030	0,030	0,30	0,30
09Г2СЮч-У (данные [12])	0,11	60	2,1	0,11	0,08	0,011	0,015	0,05	0,21

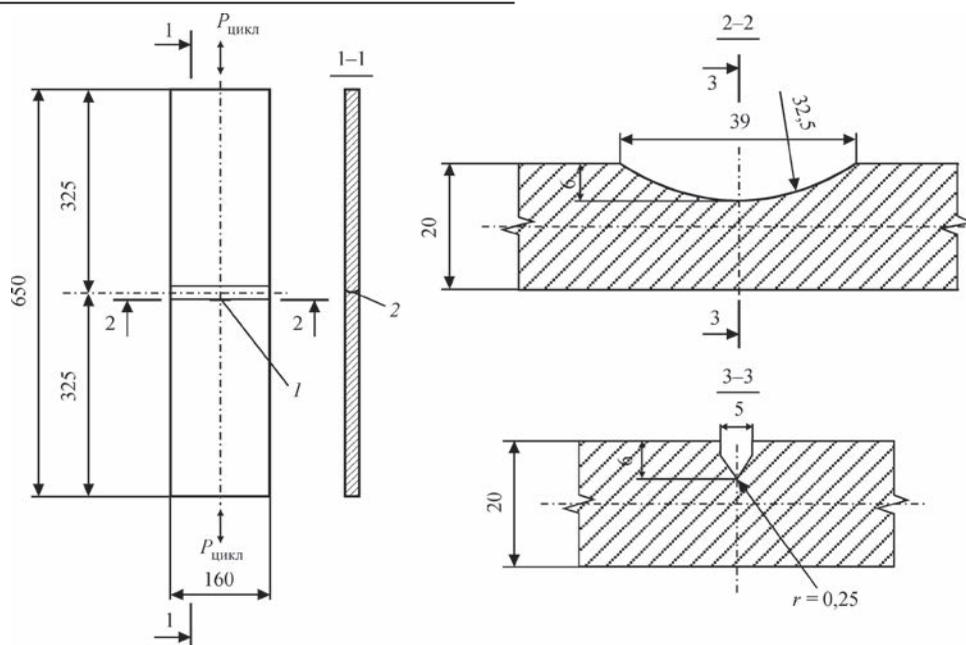


Рис. 1. Схема образца для испытания сварных соединений стали 09ХГ2СЮч-У на стойкость к развитию усталостной трещины: 1 — надрез по ЗТВ; 2 — усиление шва снято с двух сторон

ратурные данные не дают достаточной информации по рассматриваемому критерию относительно его применения в резервуарах для хранения нефти и других конструкциях. В каждом отдельном случае необходимо выполнение специальных экспериментальных исследований.

В работе [12] приведены результаты исследований сварных соединений стали 09Г2СЮч-У и программа их испытаний. Рассматриваемые исследования сварных соединений стали 09ХГ2СЮч-У также выполнены по данной программе с дополнением и учетом некоторых особенностей испытываемой стали. Программа включала испытание при циклическом нагружении трех образцов с поперечным стыковым швом (рис. 1). Поперечный стыковой шов имитировал вертикальный стыковой шов соединения листов стенки толщиной 20 мм с К-образной разделкой кромок. Химический состав и механические свойства листовой стали 09ХГ2СЮч-У представлены в табл. 2, 3. При сварке шва корневой проход вы-

полняли электродами LB52U диаметром 2,5 мм, а заполнение — FOX EV63 диаметром 3,0. Скорость охлаждения  $w_{5/6}$  составляла 10...15 °C/с. Значения  $KCV_{-40}$  в состоянии после сварки составили: 113,5...116,5 (линия сплавления) и 104,9...156,7 Дж/см<sup>2</sup> (металл шва). Для сравнения в таблицах представлены аналогичные данные для стали 09Г2СЮч-У из работы [12].

Цель исследований состояла в установлении на начальном участке образования и развития сквозной усталостной трещины в вертикальном сварном стыковом соединении стали 09ХГ2СЮч-У стенки резервуара связи между длиной трещины и количеством циклов наполнения–опорожнения емкости. При этом показать, что полученная связь развития усталостной трещины в стенке резервуара, заполненного нефтью, позволяет безопасно обнаружить усталостную трещину по критерию утечки до разрушения и своевременно принять меры по ликвидации выявленного дефекта.

Таблица 3. Механические характеристики листового проката стали 09ХГ2СЮч-У440 толщиной 23 мм

Номер п/п	Номер плавки	Толщина листа, мм	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi_z$ , %	$\sigma_t/\sigma_b$	$KCV_{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
1	Исследуемая 09ХГ2СЮч-У	23	472,1 472,9	768,6 768,2	22,5 22,7	47,8 41,0	0,61	205,0 / 135,7** 196,4 / 100,1** 199,0 / 121,1**
2	По ТУ 14-1 5065-2006 Изменение 1. Вид поставки: нормализация 09Г2СЮч-У	20...32	440	590	18	-	≤ 0,75	60, не менее
3		20...32	390	530	18	-	≤ 0,75	60, не менее
4	09Г2СЮч-У* Данные[12]	20	415	550	29	56	0,75	156

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения. \*\* Поперечные образцы/ продольные. 1. Сталь подвергается внепечной обработке с продувкой аргоном. 2. Массовая доля церия в стали должна быть в пределах 0,001...0,050 %. 3. Содержание в исследуемой стали Се — 0,004.

Максимальное усилие циклического нагружения образца  $P_{max}$  принималось с учетом, что напряжение в образце  $\sigma = 2/3 \sigma_T$  стали, а  $P_{min} = 0,1P_{max}$ . Напряжение  $2/3 \sigma_T$  соответствует, согласно работам [3, 4], максимальным расчетным кольцевым напряжениям в стенке резервуара. В каждом образце учитывались фактические размеры поперечного сечения. Зарождение усталостной трещины по линии сплавления инициировали путем применения острого надреза глубиной 6 мм и длиной 39 мм (рис. 1). В процессе роста по толщине стенки согласно диаграмме усталостных разрушений (ДУР) (см. рис. 2) макротрещина прошла участок своего стабильного развития, перешла на участок нестабильного развития и вышла на противоположную сторону. Последний участок критического развития сквозной трещины в условиях плоской деформации (рис. 3, а), характеризуется высокой скоростью ее роста (см. рис. 2). На принятых образцах длина данного участка ограничена протяженностью зоны плоской деформации. На рис. 3, б видно, что после длины трещины примерно 35 мм на ее концах появляются линии утяжки стали по толщине (типа муаровых полос), что свидетельствует о переходе металла впереди трещины в плоское напряженное состояние. Это следствие резкого приближения значения  $\sigma_{max}$  к величине  $\sigma_T$  стали при уменьшении площади нетто поперечного сечения образца. Развитие поверхностной усталостной трещины в вертикальном сварном соединении на реальной стенке резервуара будет происходить при фактически постоянном уровне кольцевых напряжений, вплоть до достижения образовавшейся сквозной усталостной трещиной своей критической длины  $l_{кр} = 2a_{кр} \approx 250...300$  мм. Для данных испытаний важно, что процесс начального прорастания трещины по толщине, выход ее на противоположную поверхность

образца и начальный этап развития сквозной трещины в условиях плоской деформации будет во многом аналогичный протеканию этого процесса в сварном соединении на стенке резервуара. Принятое условие выполнимо при проведении 100 % ультразвукового (УЗ) (радиографического) контроля длины вертикальных расчетных швов стенки резервуара.

Результаты замеров количества циклов нагружений и соответствующие значения длины поверхностной трещины даны в табл. 4, 5.

Из табл. 4 видно, что при начальной длине надреза ( $l_{нач.пов.тр}$ ) 39 мм в момент образования сквозной трещины длина поверхностной ( $l_{кон.пов.тр}$ ) трещины составила 53 мм. Образовавшиеся с двух сторон «усы» (рис. 4) имели длину 6...7 мм. Моменту образования сквозной трещины предшествовало появление нестабильности поверхности по линии выхода трещины. Зона развития трещины находилась в условиях плоской деформации. На зеркальной поверхности образца при каждом цикле раскрытия приближающейся трещины наблюдались упругие волновые деформации на линии ее появления. Сквозная трещина образовалась в виде разрыва длиной 5...7 мм ( $l_{нач.скв.тр}$ ). Произошел выход накопленной в образце потенциальной энергии с остановкой развития трещины на 5...7 с, что равно 20...30 циклам нагружения. После этого начался процесс подрастания длины уже сквозной трещины до критического размера для данного образца. Это время действия критерия утечки до разрушения. На образце, как отмечалось выше, данное время ограничено еще и протяженностью зоны плоской деформации. Приведенные в табл. 4, 5 данные относительно развития трещины от надреза и развитие сквозной трещины можно рассматривать как два последовательных этапа. Ниже приведен краткий анализ данных табл. 4, 5



Рис. 2. Участки развития макротрещины на диаграмме усталостного разрушения [15]



Рис. 3. Развитие усталостной сквозной трещины: рост в условиях плоской деформации (а) и образование утяжки стали по толщине образца на концах сквозной трещины при ее длине  $2a \geq 35$  мм (б)



Рис. 4. «Усы» на концах трещины со стороны надреза перед выходом на противоположную поверхность

относительно развития рассматриваемого дефекта в сварном соединении стали 09ХГ2СЮч-У.

*Первый этап.* Согласно данных табл. 4 усталостная трещина по всей длине (39 мм) острого надреза (рис. 1) зародилась при количестве циклов  $N_{\text{зар.пов.тр}} = 10,3$  тыс. (среднее трех образцов). С учетом принятого коэффициента запаса на количество циклов нагружений  $n_z = 10$  [16], имеем 1000 циклов. При количестве циклов наполнения-опорожнения резервуара в год  $N_{\text{год}} = 100$  [3] имеем 10 лет. При принятой периодичности технического и экспертного обследования резервуаров (5 и 10 лет) [17] такой дефект визуально или при выполнении УЗ контроля, должен быть обнаружен и устранен. Если начальная трещина будет пропущена, то она продолжит свое развитие в направлении толщины стенки (образца). Из табл. 4 видно, что до образования сквозной трещины необходимо около 11,4 тыс. циклов нагружений  $N_{\text{скв.тр}}$ . При начальной глубине усталостной трещины 2 мм скорость подрастания трещины по глубине составила  $1,1 \cdot 10^{-7}$  м/цикл. На ДУР (см. рис. 2) видно,

что процесс подрастания происходил на участке стабильного развития трещины при постоянном увеличении скорости роста. Здесь также есть возможность своевременного визуального обнаружения трещины при обследовании стенки резервуара. Анализ процесса начального развития усталостной трещины в сварном соединении стали 09ХГ2СЮч-У показывает, что наличие трещины на всю толщину стенки может быть следствием только грубого нарушения периодичности обследования резервуара или при его некачественном выполнении. На рис. 4 показана образовавшаяся перед выходом на противоположную сторону от острия надреза усталостная трещина и ее развитие в виде «усов» на концах надреза.

*Второй этап.* В табл. 5 приведены данные роста длины образовавшейся сквозной трещины в сварном соединении образца в условиях плоской деформации. Судя по скорости ее развития на ДУР (см. рис. 2) — это заключительный этап нестабильного развития усталостной макротрещины. Как отмечено выше, на образце существенно ограничена длина зоны плоской деформации. При относительно высокой скорости подрастания сквозной трещины здесь счет циклов идет на сотни. По данным табл. 5 можно утверждать, что трещина с 7 до 16 мм подросла за 300 циклов нагружений. После 300...400 циклов нагружения на поверхности концов трещины начали проявляться признаки деформации (рис. 3, а), которые при длине трещины более 35 мм перешли в утяжку по толщине образца (рис. 3, б). Полученная хорошая сходимость роста трещины на трех образцах объ-

Таблица 4. Зависимость длины  $2a$  сквозной трещины со стороны, противоположной надрезу, от количества циклов нагружения  $N$  (сталь 09ХГ2СЮч-У440,  $t = 20$  мм)

Номер образца	Марка стали, условия выполнения сварного соединения	Начальная длина трещины $2a$ , мм $N = 0,00$	Количество циклов нагружения $N$						
			100	150	200	250	300	400	600
			Длина сквозной трещины $2a$ (мм) с учетом начальной длины						
1	09ХГ2СЮч-У, нормализованная	7	10	-	14	-	6	20	26
2		7	10	-	14	-	16	18	20
3		4	8	-	12	-	14	15	17
4	09Г2СЮч-У390*, нормализованная	8	10	11	12	11	14	20	25
5		10	12	-	14	-	16	20	30
6		12	14	-	18	-	24	27	32

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения.

Таблица 5. Зависимость длины усталостной поверхностной трещины в сварном стыковом соединении от количества циклов нагружения (сталь 09ХГ2СЮч-У440,  $t = 20$  мм)

Номер образца	Марка стали	$N_{\text{пов.зар.тр.}}$ , тыс.	$l_{\text{нач.пов.тр.}}$ , мм	$N_{\text{скв.тр.}}$ , тыс.	$l_{\text{кон.пов.тр.}}$ , мм	$l_{\text{нач.скв.тр.}}$ , мм
1	09ХГ2СЮч-У440 нормализованная	10200	39	8100	53	7
2		10500	39	11800	53	7
3		7500**	39	13500	51	4
4	09Г2СЮч-У390* нормализованная	12100	41	11400	61	8
5		13300	38	9400	56	10
6		14600	47	5800	56	12

\* Данные по стали 09Г2СЮч-У390 приведены для сравнения. \*\* Была техническая остановка машины с повторным пуском и выходом на режим.

ясняется, с учетом работы [18], практически одинаковыми значениями показателей  $KCV_{-40}$  для всех зон сварного соединения.

Следует отметить, что возможности применения критерия утечки до разрушения для обнаружения сквозных усталостных трещин в металлических стенках емкостей весьма ограничены. Применительно к сосудам давления дефекты типа сквозная усталостная макротрещина недопустимы [16]. Сварные цилиндрические резервуары относятся к тем немногим сооружениям, конструкция которых и режим эксплуатации создают условия для визуального обнаружения сквозной усталостной макротрещины на поверхности сварных соединений стенки по вытекающей из нее нефти. Стенка резервуара представляет собой гладкую цилиндрическую поверхность, полностью открытую для визуального осмотра. При высоте стенки до 22 м давление хранимого продукта на стенку не превышает 0,2 МПа, температура нефти в емкости не превышает 50 °С. Нефть и нефтепродукты отличаются высокой проницательной способностью. Практика показывает, что уже при длине сквозной трещины 3...5 мм визуально наблюдается их просачивание через трещину с образованием на поверхности стенки темных пятен (отпотин). На открытой поверхности такие нефтяные пятна при осмотре хорошо обнаруживаются. Из условий эксплуатации необходимо более подробно рассмотреть длительность цикла заполнения — опорожнения резервуара. Для резервуаров вместимостью 50...100 тыс. м<sup>3</sup> длительность полного цикла составляет около 10 ч (скорость подъема в емкости нефти до 4 м/ч). Максимальное количество циклов в год составляет не более 100 [3], т. е. 1 цикл за 3,5 дня или около 8 циклов в месяц. Количество циклов, при котором четко фиксировалась на образце плоская деформация, можно принять 300. Данному количеству соответствовала длина сквозной трещины  $2a = 16$  мм. С учетом коэффициента запаса  $n_z = 10$  [16] имеем 30 циклов контролируемых нагружений, что составляет  $30 \cdot 3,5 \approx 100$  суток. В связи с тем, что по рассматриваемому вопросу имеется ограниченный объем экспериментальных и лабораторных данных [14], созданный пробел считаем возможным компенсировать применением  $n_z = 10$ . В итоге получаем расчетное контролируемое время не более 10 суток. Данного времени вполне достаточно для визуального обнаружения нефтяного пятна, выполнения УЗ контроля сварного соединения на участке просачивания нефти и принятия мер по недопущению дальнейшего роста трещины. Выявление и остановка роста трещины в сварном шве — это надежный способ предотвращения образования лавинного разрушения стенки резерву-

аров как с защитной стенкой, так и обычной конструкции, что требуется нормами [3].

Отметим, что помимо рассмотренных в данной публикации и работе [12] листовых сталей, в последнее время отечественными металлургами освоено производство ряда новых конструкционных сталей, в частности, S420M и S460M [19]. Стали выпускаются в состоянии после нормализующей прокатки, позволяющей получать листовой прокат с отношением  $\sigma_T/\sigma_B$  не менее 0,78 для S420 и не менее 0,83 для S460.

При рассмотрении вопроса о применении данных сталей для резервуаров необходимо учитывать особенности напряженного состояния стенки. Стенка резервуаров представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку. При диаметре 60...72 м и толщине нижнего пояса 26...28 мм радиальные перемещения стенки на уровне 1,0 м от дна достигают 40 и 50 мм, соответственно. При данных перемещениях сварной узел сопряжения стенки с дном пластически деформируется, что при расчете учитывается коэффициентом  $\gamma_n = 1,2$ . Кроме того, нужно учитывать, что вваривание патрубков и люков в нижний пояс выполняется в жестком контуре. В таких условиях для исключения образования холодных трещин в кольцевых швах важно, чтобы сталь имела достаточный запас пластичности. С учетом изложенного в стандарте [3] введено требование к отношению  $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,75$  для сталей  $\sigma_T \leq 440$  МПа. Важно также, чтобы листовой прокат поставлялся после нормализации, что обеспечивает хорошее качество вальцовки листов и исключает угловые деформации в вертикальных сварных соединениях стенки. Учитывая все приведенные факторы, авторы считают, что на сегодня среди предлагаемых для резервуаров стандартами [3–5] листовых сталей класса прочности S390 и S440 не содержатся приемлемые альтернативы сталям 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У.

Приведенные результаты исследований дают возможность сделать следующие выводы:

1. Механические свойства нормализованных листовых сталей 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У полностью отвечают требованиям стандартов на стальные цилиндрические резервуары. Применение данных сталей существенно повышает работоспособность и экологическую безопасность резервуаров.

2. Применение для расчетных поясов стенки резервуаров вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> и более для хранения нефти и нефтепродуктов листовых нормализованных сталей 09Г2СЮч-У и 09ХГ2СЮч-У дает возможность предупреждать лавинные разрушения стенки путем визуального выявления образовавшейся в сварном соедине-

нии сквозной усталостной трещины по критерию утечки до разрушения (пятну истекающей нефти).

3. Для визуального обнаружения трещины по критерию утечки до разрушения и принятия мер по исключению ее возможного развития при рассматриваемых сталях имеется не менее 10 безопасных суток.

### Список литературы

1. ДБН В. 1. 2-14-2009 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.*
2. ДБН В. 1. 1-12:2014 *Будівництво у сейсмічних районах України.*
3. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 *Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів.*
4. API STANDARD 650 (2013) *Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов.*
5. EN 10025-3:2004 *Горячекатаный прокат из конструкционных сталей. Технические условия поставки мелкозернистых конструкционных сталей, пригодных к сварке и подвергнутых нормализации/нормализующей прокатке.*
6. ДБН В.2.6-198:2014 *Сталеві конструкції. Норми проектування.*
7. Черников О. П., Барвинко А. Ю., Васютник А. И. и др. (2014) Современное резервуаростроение в Республике Беларусь. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, **2**, 9–13.
8. (2011) ТУ 14-1-5065-2006, Изменение 1. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч, 09Г2СЮч-У, 09ХГ2СЮч и 09ХГ2СЮч-У.
9. ТУ 14-1-5065-2006. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч, 09Г2СЮч-У, 09ХГ2СЮч и 09ХГ2СЮч-У.
10. Егорова С. В., Стеренbogen Ю. А., Юрчишин А. В. и др. (1990) Новая хладостойкая сталь общего назначения с высокой стойкостью против перегрева при сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 52–61.
11. Егорова С. В., Юрчишин А. В., Солина Е. Н. и др. (1991) Хладостойкая сталь повышенной прочности 09ХГ2СЮч для сварных сосудов высокого давления. *Там же*, **12**, 37–41.
12. Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П. (2016) О возможности предотвращения лавинных разрушений стенки цилиндрических резервуаров для хранения нефти путем применения листовой стали с повышенным значением ударной вязкости. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 44–49.
13. Давид Брокс. (1980) *Основы механики разрушения*. Пер. с англ. Москва, Высшая школа.
14. Bourga R., Moore P., Janin Y., BN Wang, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. Review Sharples International. *Journal of Pressure Vessels and Piping*, **2**, 43–49.
15. Труфяков В. И. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.
16. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. В. (1982) *Сварные сосуды высокого давления*. Москва.
17. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008 *Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів.*
18. Гиренко В. П., Дядин В. П. (1985) Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения  $\delta_{1c}$ ,  $K_{1c}$  конструкционных сталей и их сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **9**, 13–20.
19. ДСТУ EN 10025-4:2007. *Вироби горячекатані з конструкційної сталі. Частина 4. Технічні умови постачання термомеханічного оброблення зварюваних дрібнозернистих сталей* (EN 10025-4:2004, IDT).

### References

1. DBN V.1. 2-14-2009: *General principles of reliability insurance and structural safety of buildings, constructions, building structures and foundations* [in Ukrainian].
2. DBN V.1. 1-12:2014: *Construction in seismic regions of Ukraine* [in Ukrainian].
3. DSTU B V.2.6-183:2011: *Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products* [in Ukrainian].
4. API STANDARD 650: *Welded steel tanks for storage of oil products*. 12th Ed., March, 2013 [in Russian].
5. EN 10025-3:2004: *Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels*.
6. DBN V.2.6-198:2014: *Steel structures. Codes of design* [in Ukrainian].
7. Chernikov, O.P., Barvinko, A.Yu., Vasyutik, A.I. et al. (2014) Modern tank building in Belarus Republic. *Montazhnye i Spets. Raboty v Stroitelstve*, **2**, 9-13.
8. TU 14-1-5065-2006. Modification 1: Thick plate from low-alloy steel of 09G2SYuCh, 09G2SYuCh-U, 09KhG2SYuCh and 09KhG2SYuCh-U grades [in Russian].
9. TU 14-1-5065-2006: Thick plate from low-alloy steel of grades 09G2SYuCh, 09G2SYuCh-U, 09KhG2SYuCh and 09KhG2SYuCh-U [in Russian].
10. Egorova, S.V., Sterenbogen, Yu.A., Yurchishin, A.V. et al. (1990) New cold-resistant steel of general purpose with high resistance to overheating in welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 52-61 [in Russian].
11. Egorova, S.V., Yurchishin, A.V., Solina, E.N. et al. (1991) Cold-resistant 09KhG2SYuCh steel of higher resistance for welded pressure vessels. *Ibid.*, **2**, 37-41.
12. Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. (2016) On possibility of prevention of avalanche-like fractures of the wall of cylindrical tanks for oil storage by application of sheet steel with increased values of impact toughness. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 44-49 [in Russian].
13. Broek, D. (1980) *Fundamentals of mechanics of fracture*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
14. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y., BN Wang, J. (2015) Leak-before break: Global perspectives and procedures. Review Sharples Int. *J. of Pressure Vessels and Piping*, **2**, 43-49.
15. Trufyakov, V.I. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
16. Karzov, G.P., Leonov, V.P., Timofeev, B.V. (1982) *Welded pressure vessels*. Moscow [in Russian].
17. DSTU-N B A.3.1-10:2008: *Recommendation for performance of diagnostics of vertical steel tanks* [in Ukrainian].
18. Girenko, V.P., Dyadin, V.P. (1985) Dependence between impact toughness and criteria of fracture mechanics  $\delta_{1c}$ ,  $K_{1c}$  of structural steels and their welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 13-20 [in Russian].
19. DSTU EN 10025-4:2007: *Hot rolled products of structural steel. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels* (EN 10025-4:2007, IDT).

А. Ю. Барвінко, Ю. П. Барвінко,  
А. М. Яшник, В. М. Мірянін

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІЮ  
«ВИТОК ДО РУЙНУВАННЯ» ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ  
ЛАВИННОГО РУЙНУВАННЯ СТІНКИ  
ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗВАРНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

В роботі розглянуто можливість підвищення працездатності резервуарів для зберігання нафти  $V = 50 \dots 120$  тис. м<sup>3</sup> шляхом

застосування для розрахункових поясів стінки нормалізованої листової сталі 09Г2СЮч-У390 і 09ХГ2СЮч-У440. Експериментально в умовах плоскої деформації на початковому етапі розвитку наскрізної тріщини встановлено зв'язок між довжиною наскрізної втомної тріщини в зварному стиковому з'єднанні досліджуваної сталі і кількістю циклів навантаження смності. На підставі отриманого зв'язку встановлено, що після утворення в зварному з'єднанні стінки наскрізної тріщини і появи витоку нафти є достатній час і умови для її візуального виявлення та вжиття заходів щодо усунення виявленого дефекту. Можливість застосування даного способу виявлення наскрізної тріщини є доказом того, що резервуари з розрахунковими поясимами з досліджуваної сталі відповідають критеріям витоку до руйнування. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 4.

*Ключові слова:* резервуари зберігання нафти, втомна тріщина, циклічне навантаження, стикове зварне з'єднання, лавинне руйнування, критерій витоку до руйнування

A. Yu. Barvinko, Yu. P. Barvinko,  
A. N. Yashnik, V. N. Miryanin

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

#### APPLICATION OF LEAK BEFORE BREAK CRITERION FOR PREVENTION OF AVALANCHE FRACTURE OF THE WALL OF VERTICAL STEEL TANKS

The paper deals with the possibility of improving the performance of oil storage tanks with  $V = 50-120$  thous.  $m^3$  through application of normalized sheet steel 09G2SYuch-U390 and 09KhG2SYUCH-U440 for design rings of tank wall. A relationship between the length of through-thickness fatigue crack in the butt welded joint of the studied steel and number of tank loading cycles was derived experimentally under the conditions of plane deformation at the initial stage of through thickness-crack propagation. Based on the obtained relationship, it was established that after formation of a through-thickness crack in the welded joint of the wall and appearance of oil leakage, there is sufficient time and conditions for its visual detection and taking measures for elimination of the detected defect. The possibility of application of this method to detect the through-thickness crack is proof of the fact that tanks with design rings from the studied steel satisfy the leak-before-creak criterion. 19 Ref., 5 Tabl., 4 Fig.

*Keywords:* oil storage tanks, fatigue crack, cyclic loading, butt welded joint, avalanche fracture, leak before break criterion

Поступила в редакцію 05.03.2018

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



## Міжнародна конференція «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ

Голова:  
академік НАН України Л. Лобанов  
НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03150  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com