

# О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИННЫХ РАЗРУШЕНИЙ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

А. Ю. БАРВИНКО, Ю. П. БАРВИНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Экспериментально в условиях циклического нагружения специальных образцов со стыковым сварным соединением получена зависимость скорости развития усталостной трещины по толщине сварного вертикального соединения стенки резервуара и сквозной трещины на начальном этапе ее развития от количества циклов нагружения. Нагружение образцов соответствовало работе сварных соединений стенки резервуаров для хранения нефти. Образцы изготовлены с листовой стали 09Г2СЮч-У390,  $t = 22$  мм,  $KCV_{-40} \geq 80$  Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что использование для стенки стали с высокими значениями ударной вязкости позволяет визуально выявлять (по нефтяному пятну) образовавшуюся в стенке сквозную трещину, что исключает возможность ее лавинного разрушения.

*Ключевые слова:* резервуары для хранения нефти, сталь с повышенной вязкостью, развитие вязкой трещины, предотвращение лавинных разрушений

В течение последнего десятилетия произошло обновление ведущих стандартов на устройство вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [1–3]. В новых стандартах существенно конкретизированы в сторону ужесточения требования к конструкции стенки резервуара, к свойствам листовых сталей. В частности, нормы [2, 3] дополнены требованием к листовым сталям о выполнении отношения  $\sigma_t / \sigma_b \leq 0,75$  при  $\sigma_t \leq 440$  МПа и отдельным параграфом указаний относительно проектирования резервуаров с защитной стенкой. В последние годы резервуары с защитной стенкой ( $V = 50 \dots 75$  тыс. м<sup>3</sup>) широко применяются при реконструкции действующих резервуарных парков [4]. С целью повышения их надежности в нормативные документы [2, 3, 5] введено требование о необходимости предусматривать конструктивные мероприятия для предотвращения лавинных разрушений и полного раскрытия стенки рабочего резервуара. Разъяснения, что собой представляют мероприятия, в нормах отсутствуют. Возможность лавинного (стремительного) вязкого разрушения стенки рабочего резервуара рассмотрена авторами в работе [6]. Показано, что предлагаемые [7] конструктивные мероприятия в виде устройства на нижних поясах стенки двух-трех бандажей (на каждом поясе) не могут обеспечивать требуемой работоспособности стенки. Более перспективно достижение достаточной работоспособности стенки внутреннего резервуара путем применения новых

сталей с повышенными вязкими свойствами и обеспечением высокого качества ее сварных соединений. Данное направление уже успешно опробовано при строительстве резервуаров с защитной стенкой [4]. Применение качественной нормализованной листовой стали класса прочности С390 и С420, имеющей показатели  $KCV_{-40} > 80$  Дж/см<sup>2</sup> и сварных соединений с равноценными основному металлу механическими характеристиками создало основу для разработки научного обоснования возможности предотвращения лавинного разрушения стенки резервуара, выполненной с указанных сталей.

Лавинные разрушения характерны для протяженных емкостных конструкций, наполненных газообразной средой под давлением. Типичный их представитель – магистральные газопроводы диаметром 800...1400 мм при толщине стенки 16...24 мм и давлением транспортируемого газа 5,5...12,0 МПа. Возникшая в продольном сварном стыковом соединении стенки трубы макротрещина в условиях циклического нагружения стенки транспортируемым газом со временем достигает критического размера, равного для газопроводов  $2i_{кр} \approx 250 \dots 350$  мм [8]. Под действием давления сжатого газа трещина начинает раскрываться, и в вершине вязкой трещины при критическом угле раскрытия берегов образуется бегущая зона пластического течения, в которой металл последовательно течет, упрочняется и разрушается. Движущей силой бегущей зоны (трещины) на данном этапе будет упругая энергия истекающего из тру-

бы газа. При применяемых для стенки трубы значениях  $KCV = 60...120$  Дж/см<sup>2</sup> вязкое разрушение распространяется в продольном направлении трубы со скоростью 60...250 м/с. При достижении трещиной эффективной максимальной длины начинается явление декомпрессии. Уменьшаются внутреннее давление и окружное разрушающее напряжение в вершине трещины, что приводит к ее остановке.

В вертикальных сварных соединениях стенки резервуара условия образования и развития макротрещины идентичны только до достижения критической длины. Максимальные рабочие кольцевые напряжения в расчетных поясах стенки равны  $2/3 \sigma_r$ , количество циклов нагружений не более ста в год. Через 10 лет эксплуатации количество циклов нагружения стенки составит  $10^3$ . При расчетном сроке службы резервуара 40 лет максимальное число нагружений не превысит  $4 \times 10^3$ , что не выходит за область малоциклового усталости.

Это область, в которой интенсивно развиваются усталостные трещины с местной концентрацией напряжений в вершине, удовлетворяющей неравенство:  $\sigma_{м.к.} > 2\sigma_r$ , где  $\sigma_{м.к.}$  – уровень местных напряжений в зоне концентрации. Развитие усталостной трещины при этом происходит с упругопластической деформацией металла в зоне концентрации (ее вершине) как на стадии нагружения, так и при разгрузке стенки [9]. Такое развитие обусловлено взаимодействием зоны концентрации с основным объемом металла стенки. Развитие усталостных трещин происходит при меньшем числе циклов.

После достижения усталостной трещиной критической длины должна появиться, как указано выше, новая движущая сила трещины – потенциальная энергия хранимой жидкости, которая находится выше трещины. При высоте стенки резервуара 20,0 м и удельном весе хранимого несжимаемого продукта 1000 кг/м<sup>3</sup> давление на стенку не будет превышать 0,2 МПа. Трудно представить, какая должна быть длина усталостной трещины при таком давлении и толщине стенки резервуара 16...20 мм, чтобы произошло раскрытие ее берегов до критических размеров с последующим процессом вязкого разрушения стенки резервуара. Видимо поэтому авторы не нашли в литературе случаев вязкого разрушения стенки резервуаров.

В этих условиях авторы считали целесообразным исследовать возможность предотвращения лавинного разрушения стенки резервуара путем выявления сквозной трещины в вертикальном сварном соединении стенки с применением критерия утечки до разрушения на начальном (докритическом) этапе ее развития. Применение данно-

го критерия в сварных сосудах высокого давления рассмотрено в работе [10]. Установлено, что после того, как трещина «проскакивает» толщину стенки, в емкости образуется утечка и есть время для того, чтобы обнаружить трещину до достижения ее критического размера.

Исследования показали, что относительно сосудов давления достичь выполнения условий утечки в условиях плоской деформации не так легко. При этом учитывается, что потеря работоспособности сосудов в первую очередь связана с нарушением их герметичности, т. е. с образованием сквозных трещин. Наличие высокого давления, температуры и токсичности продукта хранения требуют при образовании в стенке сосуда сквозной трещины даже начальной длины принятия срочных мер по ее локализации.

В этом отношении резервуары для хранения нефти имеют существенно лучшие условия относительно их безопасности. Внутреннее избыточное давление не более 0,002 МПа, давление продукта хранения на стенку не более 0,2 МПа, температура стенки не более 180 °С, продукт хранения мало токсичен. Количество циклов заполнений–опорожнений резервуара приведено выше. Опыт эксплуатации резервуаров показывает, что уже после образования в сварном стыковом соединении стенки сквозной трещины длиной 5...10 мм происходит просачивание нефти с образованием на поверхности стенки темного пятна. Разработка и освоение металлургами промышленного выпуска новых марок нормализованных качественных сталей (09Г2СЮч-У, 18Г2АВ [11, 12]) с содержанием серы  $S \leq 0,015$  % и значением  $KCV_{-40} \geq 80$  Дж/см<sup>2</sup> создали условия, при которых развитие сквозной трещины в сварном соединении на начальном этапе может иметь участок предсказуемого развития. Его наличие наблюдалось при испытании отдельных образцов с усталостной сквозной трещиной. Это небольшой участок, но для резервуаров с количеством нагружений сто в год даже 500 циклов дает достаточно времени для визуального выявления трещины по нефтяному пятну и надежного предотвращения разрушения емкости.

Необходимость исследований начального этапа развития трещины диктовалась и производственной необходимостью. С применением указанных сталей уже построены и успешно эксплуатируются резервуары с защитной стенкой объемом 50 и 75 тыс. м<sup>3</sup> [4]. Причем, по проекту стали с повышенными вязкими свойствами выполняют функции и по предотвращению лавинных разрушений стенки рабочего резервуара, что требуется в стандартах [2, 3, 5]. Выполненные исследования должны были научно обосновать принятое решение.

С учетом приведенных обстоятельств была составлена программа экспериментальных исследований процесса зарождения и развития усталостной трещины в вертикальном сварном стыковом соединении стенки резервуара в условиях плоской деформации.

*Цель исследований:*

– определить время (выраженное количеством циклов нагружений) зарождения усталостной трещины на длине искусственного острого надреза, выполненного в сварном стыковом соединении образца и время прорастания усталостной трещины по толщине образца до выхода на противоположную поверхность;

– получить зависимость увеличения в условиях плоской деформации длины образовавшейся сквозной трещины от количества циклов нагружения на начальном этапе ее развития.

*Программа предусматривала:* в условиях циклического нагружения выполнить испытание трех плоских образцов с поперечным стыковым сварным соединением. В процессе испытания образец должен максимально отражать работу сварного вертикального соединения стенки резервуара. Испытания выполнить на пульсаторе ЦДМ-200ПУ. Рабочее усилие пульсатора  $P_{\max} = 100$  т. Принятая частота нагружения 5 Гц. В качестве инициатора усталостной трещины в образце по линии сплавления сварного шва выполнить фрезой надрез с радиусом в вершине 0,25 мм.

В соответствии с программой испытания образец состоял из двух пластин стали 09Г2СЮч-У390 (рис. 1), сваренных поперечным сварным стыковым швом. Химический состав

и механические свойства стали представлены в табл. 1 и 2. Толщина пластин 22 мм. Разделка кромок V-образная с одной вертикальной кромкой, что позволило иметь четкую линию сплавления по всей толщине образца. Сварка выполнялась электродами LB-52U с выводом шва на выводные планки. Усиления шва с двух сторон было снято фрезерованием поверхности до толщины 20 мм. Чистота обработки поверхности позволяла контролировать появление утяжки по толщине образца на концах трещины в процессе его испытания. Толщина 20 мм соответствует толщине III или IV пояса стенки резервуаров  $V = 50...75$  тыс. м<sup>3</sup>. Предварительно было установлено, что ширина образца 160 мм позволяет обеспечить условия плоской деформации при развитии сквозной трещины до длины 40...45 мм. Напряжение в образце  $\sigma_{\max} = 2/3 \sigma_r$ , что соответствует расчетным напряжениям в стенке резервуаров [1], а  $\sigma_{\min} = 0,1 \sigma_{\max}$ .

Всего было испытано три образца. Надрез на третьем выполнялся более толстой фрезой с несколько большим радиусом в вершине, что отразилось в определенной мере на результатах первого этапа испытаний. Результаты первого этапа приведены в табл. 1. Этап заканчивается выходом начальной поверхностной трещины на противоположную сторону образца и состоит из двух периодов: зарождения усталостной трещины по линии острого надреза и развития усталостной трещины по толщине образца до образования сквозной трещины.

Первый период характеризует чувствительность стали к поверхностным острым надрезам. При этом надо принимать во внимание, что

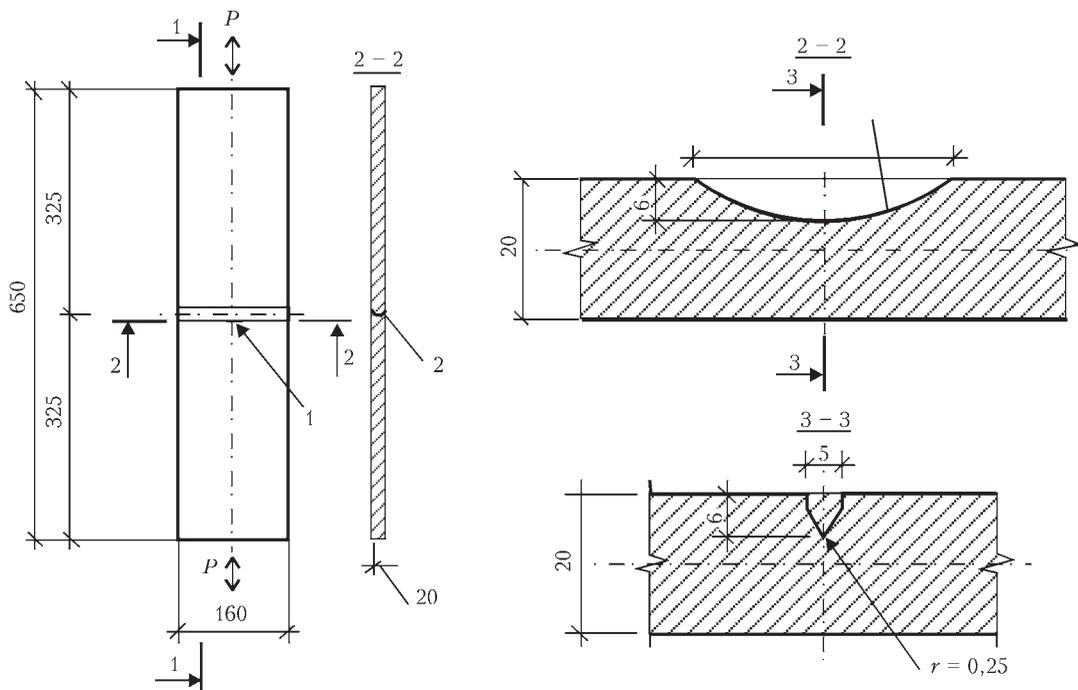


Рис. 1. Схема и размеры образцов для испытания сварного соединения стали 09Г2СЮч-У390 на циклическую трещиностойкость; надрез по линии сплавления; усиление снято с двух сторон

**Таблица 1. Химический состав стали 09Г2СЮч-У 390, мас. доля, %**

C, ×0,01	Mn, ×0,01	Si, ×0,01	S, ×0,001	P, ×0,001	Cr, ×0,01	Ni, ×0,01	Cu, ×0,01	Al, ×0,001	V, ×0,01	Ce, ×0,001
По ТУ 14-1-5065. Изменение 1 [11]										
10...13	190...220	50...80	12	15	< 30	< 30	< 3	40...80	–	1...5
Данные ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ										
11	210	60	11	15	11	21	5	80	–	4

**Таблица 2. Механические характеристики листового проката стали 09Г2СЮч-У390**

Толщина листа, мм	$\sigma_T$ Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\Psi_{2'}$ , %	$\sigma_T/\sigma_B$	KCV <sub>-40</sub> , Дж/см <sup>2</sup>
По ТУ 14-1-5065–2006. Изменение 1 [11]						
От 8 до 50	390	530	18	-	0,74	≥ 60
Данные ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ						
20	415	550	29	56	0,75	156

размеры надреза на образце существенно превышают возможные повреждения поверхности листов стенки резервуара, что дает определенный запас полученным результатам. Из табл. 1 видно, что для зарождения усталостной трещины по всей длине принятого надреза необходимо не менее 12 тысяч циклов нагружений. При нормативной интенсивности нагружений резервуаров 100 в год и расчетном сроке службы резервуара 50 лет имеем  $5 \times 10^3$  циклов нагружения, что более чем в два раза превышает полученное значение.

Полученные данные показывают, что при применении стали 09Г2СЮч-У процесс зарождения усталостной трещины в сварных соединениях может растянуться на весь срок эксплуатации емкости. Надо учитывать, что в реальности на стенке могут быть участки швов с пониженными пластическими свойствами. На них зарождение трещины произойдет при значительно меньшем количестве циклов нагружения. Процесс развития данных трещин рассмотрен ниже.

Во втором периоде исследован процесс подрастания зародившейся усталостной трещины по толщине образца. Из табл. 3 видно, что выполнение на третьем образце надреза более толстой фрезой существенно повлияло на началь-

ную длину трещины и развитие ее по толщине образца. Здесь оценка интенсивности выполнена по двум образцам № 1 и 2. Количество циклов их нагружений до образования сквозной трещины составило порядка  $10 \times 10^3$ , что, как и в первом периоде, вдвое превышает число нагружений ( $5 \times 10^3$ ) резервуара за весь расчетный срок службы. Это имеет важное практическое значение. Согласно НД [2, 3] с периодичностью десять лет проводится полное обследование резервуаров с выполнением радиографического или УЗ контроля сварных соединений стенки. Срок десять лет – это  $10 \times 100 = 10^3$  циклов нагружений, т.е. есть достаточные условия для выявления с определенным запасом усталостной трещины в сварных соединениях стенки.

На втором этапе исследований определялась скорость критического развития сквозной трещины. На данном этапе коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины приближается к своему критическому значению  $K_c$ , что существенно увеличивает скорость развития трещины.

После выхода на противоположную поверхность произошла остановка трещины на 3...5 с последующим ее страгиванием и развитием. Это начало отсчета нагружений. Результаты испытания представлены на табл. 4. На образце развитие трещины ограничено наличием условий плоской деформации

**Таблица 3. Результаты фиксации развития трещины на образцах с начальным поверхностным надрезом по зоне сплавления на поперечном стыковом шве в процессе циклического нагружения**

Номер образца	Марка листовой стали	Условия выполнения сварного соединения	Количество циклов от момента выхода пультатора на рабочий режим испытания до момента зарождения усталостной трещины по всей длине надреза, N, цикл	Длина начальной усталостной трещины на поверхности образца, мм	Количество циклов от зарождения трещины по всей длине надреза до образования сквозной трещины, N, цикл	Длина поверхностной трещины со стороны надреза при образовании сквозной, мм	Начальная длина сквозной трещины при выходе ее на противоположную сторону, мм
1	09Г2СЮч-У390 нормализованная	Сварка в свободном состоянии	12100	41	11400	61	8
2			13300	38	9400	56	10
3			14600	47	5800	58	12

Т а б л и ц а 4. Длина  $2a$  сквозной трещины со стороны противоположной надрезу при количестве циклов нагружения образца  $N$

Номер образца	Марка стали, условия сварки	Начальная длина трещины $2a$ , мм при $N_{нач.} = 0$	Количество циклов нагружения $N$						
			100	150	200	250	300	400	600
			Длина сквозной трещины $2a$ , мм с учетом начальной длины						
1	09Г2СЮч-У390 нормализованная, сварка в свободном состоянии	8	10	11	12	11	14	20	25
2		10	12	-	14	-	16	20	30
3		12	14	-	18	-	24	27	32

Примечание. Длина критической сквозной трещины  $2a_{кр} \sim 210$  мм

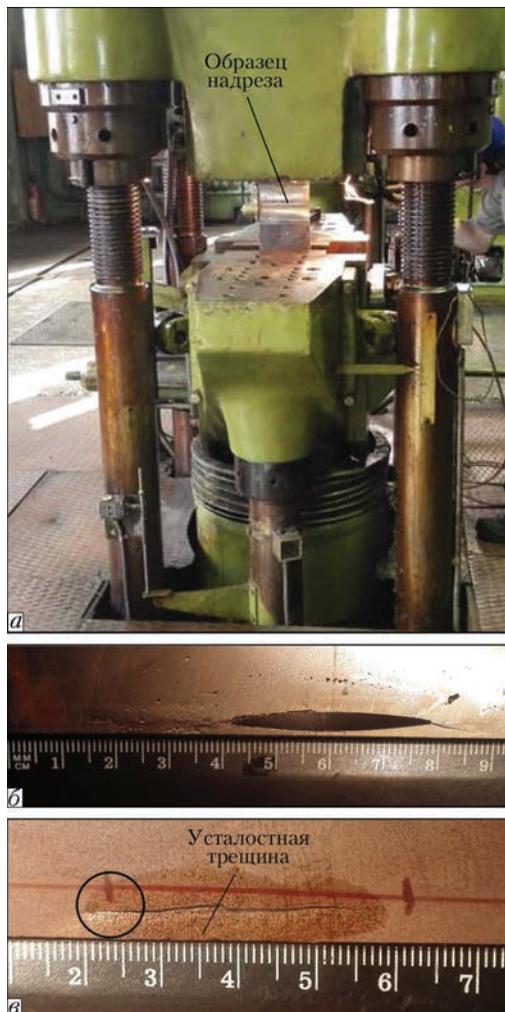


Рис. 2. Испытание образцов при циклическом нагружении: а – общий вид пульсатора ЦДМ-200ПУ; б – образование усталостной трещины от острого надреза; в – развитие сквозной трещины на обратной к надрезу стороне образца (кружком отмечено начало утяжки)

ции. Для испытываемых образцов это 30...32 мм, что соответствует 500...600 нагружений. При данном количестве циклов на концах трещины начала появляться утяжка образцов по толщине, что свидетельствовало о переходе образца в плоское напряженное состояние. На этом испытания прекращались. Отметим, что практически те же результаты были получены для стали 06ГБ [13].

С учетом отсутствия возможности четкого визуального фиксирования на поверхности образца условий плоской деформации в качестве оценоч-

ного результата принят период до 300 циклов нагружений, что соответствует предсказуемой длине трещины 17 мм. Ясно, что на реальной стенке резервуара предсказуемый участок развития трещины будет иметь большую длину, что пройдет в запас трещиностойкости стенки.

При коэффициенте запаса по количеству циклов  $K_N = 10$  [9] имеем 30 циклов нагружений. При количестве циклов в год 100, что приведено выше, и 350 заполнений–опорожнений в год согласно [14], имеем 90 и 30 с безопасного развития трещины в стенке реального резервуара и ее визуального выявления. Регламентом технического обслуживания резервуаров предусматривается ежедневный визуальный осмотр всей поверхности стенки с занесением результатов осмотра в специальный журнал. Такой осмотр гарантирует выявление появившейся сквозной трещины в сварном соединении стенки резервуара по нефтяному пятну на начальном этапе ее критического развития.

Наличие условий для гарантированного выявления сквозной трещины на начальном этапе ее развития исключает возможность лавинного разрушения стенки резервуара, что удовлетворяет требованию нормативных документов [2, 3]. При этом из условий безопасности важно, что при давлении на стенку 0,2 МПа из начальной трещины истечение нефти на стенке происходит в виде просачивания с образованием темного пятна.

Длительность предсказуемого развития трещины 90 и 30 сут получена на сварных соединениях образцов, сваренных и прошедших контроль в лабораторных условиях. В сварных соединениях, выполняемых в условиях площадки строительства, в сварном шве возможно наличие пропущенных дефектов, которые могут существенно ускорить процесс развития трещин. В сварных соединениях стенки резервуаров РВСПК 50 тыс. м<sup>3</sup>, сталь 16Г2АФ толщиной 14 мм, авторы выявляли в летнее время по нефтяным пятнам трещины длиной 3...5 мм. С учетом приведенного считаем приемлемым для нейтрализации выявленной трещины в сварном соединении стенки со стали 09Г2СЮч-У принимать в регламенте технического обслуживания срок не более 5 сут.

**Выводы**

На основании результатов испытания специальных образцов из стали 09Г2СЮч-У390 с иницированием усталостной трещины в сварном стыковом соединении установлено следующее.

Образование в сварном стыковом соединении стали 09Г2СЮч-У от острого поверхностного надреза принятой длины усталостной трещины на всю толщину образца (20 мм) занимает более 10 лет эксплуатации резервуаров. Такой срок превышает принятую нормативную периодичность полного диагностирования сварных соединений стенки (не более 10 лет) и позволяет выявлять имеющиеся в сварном соединении трещины на стадии их развития по толщине стенки.

На начальном этапе подрастания в сварном стыковом соединении стали 09Г2СЮч-У390 сквозной усталостной трещины есть участок предсказуемого ее развития. Длительность предсказуемого участка критического развития трещины в условиях плоского напряженного состояния составляет около 300 циклов нагружений при нормативном количестве нагружений резервуаров не более 100 в год. Продолжительность во времени критического развития трещины на данном участке позволяет по визуально выявляемому на поверхности стенки пятну нефти надежно выявлять и предотвращать лавинные разрушения стенки резервуаров.

Результаты выполненных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины исследований развития сквозных трещин в сварном стыковом соединении листовой нормализованной стали 09Г2СЮч-У390 на участке их нестабильного развития подтверждают целесообразность применения листового проката данной стали для расчетных поясов стенки цилиндрических резервуаров для хране-

ния нефти объемом 50, 75, 100 тыс. м<sup>3</sup> и внесение ее в соответствующий стандарт Украины.

1. Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов: API STANDART 650, 12 ред., 2013. – С. 514.
2. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів: ДСТУ Б В.2.6–183:2011. – К.: Мікрореґіон України, 2012. – С. 77.
3. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов: ГОСТ Р 52910–2008. – М.: Стандартиформ, 2008. – С. 52.
4. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов: ТКП 45-5.04-172–2010 (02250). – Минск, 2011. – С. 153.
5. Современное резервуаростроение в Республике Беларусь / О. П. Черников, А. Ю. Барвинко, А. И. Васютки [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2014. – № 12. – С. 9–13.
6. Применение листовой качественной стали повышенной прочности в резервуарах для хранения нефти / А. Ю. Барвинко, А. В. Юрчишин, Ю. П. Барвинко [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2016. – № 1. – С. 2–8.
7. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов: СТО-СА-03-002–2009. – М., 2009.
8. Иванцов О. М. Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – С. 165.
9. Карзов Г. П. Сварные сосуды высокого давления / Г. П. Карзов, В. П. Леонов, Б. Т. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1982. – С. 287.
10. Брок Д. Основы механики разрушения / Д. Брок. – М.: Высш. шк., 1980. – С. 368.
11. Изменение 1. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч; 09Г2СЮч-У; 09ХГ2СЮч; 09ХГ2СЮч-У: ТУ 14-1-5065–2006. – Введ. 01.03.2012
12. Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości Gatunki: PN-86 H-84018 POLSKA NORMA.
13. Обоснование критерия «течь перед разрушением» применительно к вертикальным цилиндрическим резервуарам для хранения нефти / В. В. Кныш, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 9. – С. 29–33.
14. ОАО «АК «Транснефть». Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000...50000 м<sup>3</sup>: РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. – М., 2004. – С. 71.

Dependence of a rate of fatigue crack propagation along the thickness of vertical welded joint of reservoir wall and through-the-thickness crack at initial step of its development on number of loading cycles was developed experimentally under conditions of cyclic loading of special specimens with butt joint. Specimens' loading corresponded to the work of welded joints in wall of oil storage reservoir. The specimens are manufactured from sheet steel 09G2SYuch-U390,  $t = 22$  mm,  $KCV_{40} \geq 80$  J/cm<sup>2</sup>. It is shown that using the steel with high indices of impact toughens for wall allows visual detection (by oil plume) of through-the-thickness crack formed in the wall that eliminates the possibility of its avalanche-type fracture.

*Keywords*: oil storage reservoirs, steels with increased ductility, propagation of ductile crack, prevention of avalanche-like fractures.

Поступила в редакцию  
28.04.2016