



# ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗАВОДСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 09Г2С-12 СТЕНКИ РУЛОНИРОВАННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПОСЛЕ 20–25 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. П. БАРВИНКО

*Увеличение сроков службы стальных цилиндрических рулонированных резервуаров большой вместимости требует не только восстановления работоспособности отдельных конструктивных элементов в связи с их механическими или коррозионными повреждениями, но и оценки остаточного ресурса работоспособности сварных соединений стенки. Выполнены экспериментальные исследования остаточного ресурса указанных соединений из стали 09Г2С-12. Соединения вырезаны из стенки резервуара после его эксплуатации в течение 25 лет в режиме малоциклового нагружения. Приведены результаты исследований.*

*Extension of service life of cylindrical coiled steel tanks of large capacity requires not only restoration of the performance of individual structural elements in connection with their mechanical or corrosion damage, but also assessment of the residual life of welded joints of the wall. Experimental studies of residual life of the above joints of 09G2S-12 steel were performed. Samples were cut out of the tank wall after its operation for 25 years in the low-cycle loading mode. Investigation results are given.*

Вследствие относительно высоких прочностных свойств, низкого содержания углерода, достаточной для многих климатических районов хладостойкости, хорошей свариваемости и умеренной стоимости горячекатаная сталь 09Г2С-12 находит широкое применение в большинстве ответственных строительных конструкций. Сталь 09Г2С-12 применяется для нижних поясов стенки рулонированных резервуаров вместимостью 10, 20 и 50 тыс м<sup>3</sup>. Большинство нефтепарков в Украине с резервуарами указанной вместимости были построены в 1960–1970 гг. в связи с появлением в европейской части страны нефти тюменских месторождений. К настоящему времени резервуары в основном отработали (в режиме малоциклового нагружения) нормативный срок службы, равный 20 годам, и по результатам обследований был выполнен или требуется выполнение капитального ремонта. Учитывая высокую стоимость листового проката, рабочей силы и нанесение на основные конструкции антикоррозионной защиты со сроком службы не менее 10...15 лет, заказчики качественно повысили требования к капитальному ремонту. Резервуары после ремонта должны, по возможности, отвечать новым нормам Украины по конструктивным решениям и иметь гарантированную работоспособность при последующей эксплуатации в течение не менее 20 лет [1].

Выполнение приведенных требований существенно увеличило объем работ, который необходимо выполнить при капитальном ремонте резер-

вуаров. Капитальный ремонт при требуемой гарантии работоспособности резервуаров в большинстве случаев включает полную замену днища с обновлением гидрофобного слоя, нижней части или полностью первого пояса стенки, люков-лазов с Ду = 500 на Ду = 600, замены по всей высоте вертикальных монтажных стыков стенки, настила купольного покрытия или центральной части плавающей крыши. В отдельных случаях при необходимости выполняется подъем резервуара для исправления недопустимого крена, а для емкостей вместимостью 5 тыс м<sup>3</sup> и менее устройство железобетонного кольцевого фундамента. Все сварные швы, выполняемые в процессе ремонта, подлежат 100%-му УЗ или радиографическому контролю. Заводские вертикальные швы контролируются в объеме, соответствующем требованиям [2, п.4.96]. На основании анализа заключения по контролю швов может быть принято решение о значительном увеличении объема их контроля.

После выполнения ремонта стенки и днища резервуаров в приведенном объеме практически работоспособность рулонированных резервуаров в последующие 20 лет будет определяться остаточным ресурсом вертикальных заводских соединений стенки. В то же время данные в литературе по исследованию остаточного ресурса заводских вертикальных соединений стенки резервуаров в условиях малоциклового нагружения фактически отсутствуют. Нет и производственного опыта, так как рулонированные резервуары вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> и более в условиях малоциклового наг-



ружения начали эксплуатироваться в 1970-х годах. Поэтому вопрос об остаточном ресурсе указанных соединений широко применяемой стали 09Г2С-12 имеет для эксплуатационников большое практическое значение.

По заданию предприятия «Приднепровские магистральные нефтепроводы» (г. Кременчуг), филиала ОАО «Укртранснефть» в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины выполнены экспериментальные исследования по определению остаточного ресурса заводских вертикальных сварных соединений из стали 09Г2С-12 стенки рулонированных резервуаров после их эксплуатации в течение 20–25 лет в условиях малоциклового нагружения.

Оценку работоспособности (ресурса) выполнили на основании сравнения механических свойств (механических характеристик и значений ударной вязкости) исходных и текущих сварных соединений на их соответствие нормативным требованиям, которые действовали при проектировании емкостей [3, 4] и предъявляются в настоящее время [5, 6].

Исследованию подлежали пластины с заводским вертикальным соединением, вырезанные в процессе капитального ремонта в 2006 г. с первого пояса резервуара вместимостью 20 тыс м<sup>3</sup>, введенного в эксплуатацию в августе 1982 г., т. е. после 24 лет эксплуатации.

**Исходный и текущий материалы — пластины с вертикальным заводским швом.** Экспериментальные исследования остаточного ресурса носят сравнительный характер и требуют наличия пластин с исходным заводским сварным соединением и с текущим сварным соединением, т. е. после 20–25 лет эксплуатации резервуара в условиях малоциклового нагружения. Методика экспериментальных исследований остаточного ресурса заводских сварных соединений резервуаров близка к методике таких же исследований остаточного ресурса продольных сварных соединений магистральных трубопроводов, выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона [7, 8]. В качестве исходного материала приняты пластины, вырезанные из аварийного запаса труб, отложенных с определенным интервалом вдоль трассы при строительстве трубопроводов, а текущего — пластины (катушки), вырезанные из действующих магистральных тру-

бопроводов при восстановлении аварийных участков. Такой подход подсказал идею получения текущего материала (заготовок) с исходных в лабораторных условиях путем искусственного их нагружения на машинах-пульсаторах до требуемого количества циклов. Заготовки с исходных пластин имели ширину 150 мм, длину рабочей части 310 мм и расположение вертикального шва поперек заготовки. По данным журналов нефтеперекачивающих станций ежесуточного учета налива–слива нефти в период интенсивной работы резервуары имели в сутки два цикла максимального налива–слива нефти. За 20 лет эксплуатации при 300 рабочих дней в году это составило  $N = 20 \times 2 \times 300 = 1,2 \times 10^4$  циклов. Циклическое нагружение заготовок для текущих пластин выполняли на пульсаторе ЦДМ-200 с частотой 1 Гц. Напряжение в заготовке составляло от  $0,1\sigma_T$  до  $0,67\sigma_T$ . Предварительно было нагружено четыре заготовки без выравнивания кривизны стенки резервуара. На всех заготовках в металле ЗТВ появились усталостные трещины длиной 15...20 мм после количества циклов  $N$ , равном  $10^5$ ;  $3,4 \times 10^4$ ;  $7 \times 10^4$ ;  $8 \times 10^4$ , что превышает требуемое значение  $N = 1,2 \times 10^4$ . На последующих двух заготовках, выравненных с исключением деформаций шва и околшовной зоны, после  $N = 10^5$  циклов визуально трещин не обнаружили. Изготовили еще три выравненные заготовки. После нагружения до  $N = 1,2 \times 10^4$  циклов с заготовок, как с текущих пластин, были изготовлены все необходимые образцы.

**Программа проведения необходимых экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования выполняли путем сравнения результатов испытаний образцов, предусмотренных программой. При этом было принято, что исходные и текущие сварные соединения состоят из основного металла, металла ЗТВ и металла шва. Программа испытаний представлена в табл. 1.

Схема расположения образцов исходного и текущего сварных соединений показана на рис. 1. С учетом траектории распространения гипотетической трещины определение ударной вязкости выполнено на продольных образцах.

**Исследование механических свойств исходного и текущего сварных соединений, выпол-**

Таблица 1. Перечень исследований и испытаний сварных соединений, выполненных из стали 09Г2С-12

Наименование исследований и испытаний	Исходное сварное соединение			Текущее сварное соединение		
	основной металл	шов	ЗТВ	основной металл	шов	ЗТВ
Входной радиографический контроль сварных соединений	+	+	+	+	+	+
Определение химического состава основного металла	+	–	–	–	–	–
Определение механических характеристик	$\sigma_T$ ; $\sigma_B$ ; $\delta_5$ , %; $\psi$ , %			$\sigma_B$		
Определение ударной вязкости $KCU$ и $KCV$ (+20 °С; 0 °С; –20 °С; –40 °С)	+	+	+	+	+	+

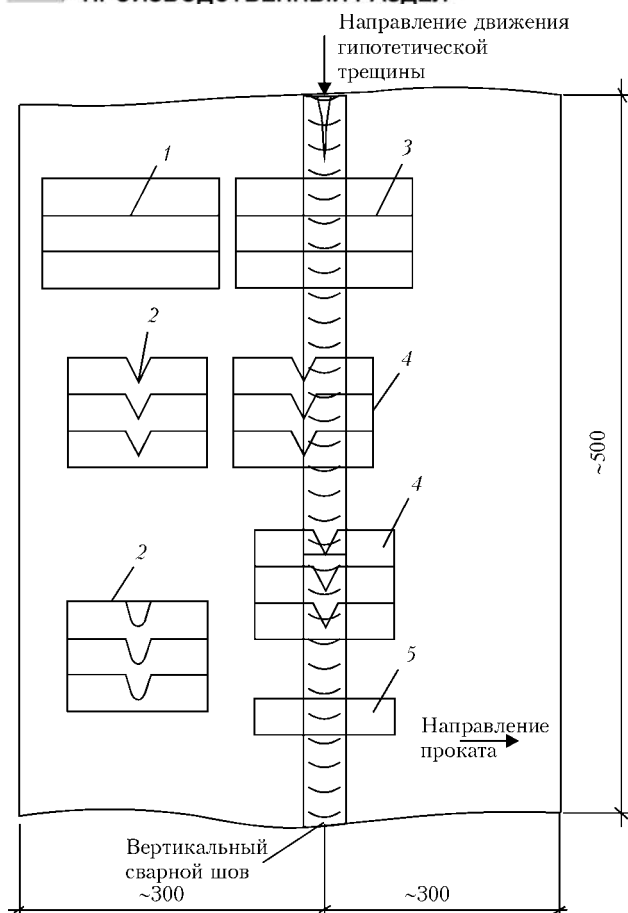


Рис. 1. Схема расположения на пластине-заготовке со сварным швом образцов: 1 — для механических испытаний основного металла; 2 — с надрезами *KCU* и *KCV* для определения ударной вязкости; 3 — для механических испытаний шва; 4 — с надрезами *KCU* и *KCV* для определения ударной вязкости металла шва и ЗТВ; 5 — для металлографических исследований

ненных из стали 09Г2С-12. Как отмечено выше, сталь 09Г2С-12 по ГОСТ 19282-73 [3] представляет собой горячекатаную, кремнемарганцевую сталь с относительно низким содержанием углерода и оптимальным соотношением Mn-Si. Учитывая, что заготовки для исходного и текущего сварных соединений вырезаны с одного резервуара и расположены на одном вертикальном шве первого пояса стенки, их химический состав можно принять одинаковым. Результаты спектрального анализа приведены в табл. 2. Спектральный анализ показал, что химический состав основного металла сварных соединений отвечает требованиям, представленным в [3].

Механические характеристики основного металла исходного и текущего сварных соединений определяли на пятикратных образцах (ГОСТ 1497-73 тип III). Результаты испытаний представлены в табл. 3, из которой видно, что механические свойства основного и текущего металла удовлетворяют требованиям ГОСТ 19282-73 [3], с учетом которого был запроектирован резервуар. Име-

Таблица 2. Химический состав основного металла исходного и текущего сварных соединений, мас. %

Основной металл		C	Si	Mn	S	P
Образцы с пластин	проба 1	0,11	0,60	1,40	0,026	0,030
	проба 2	0,11	0,69	1,38	0,029	0,030
По ГОСТ 19282-73		≤ 0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	≤ 0,035	≤ 0,035

ющиеся расхождения  $\sigma_B$  находятся в пределах допусков данного норматива.

**Хладостойкость основного металла исходного и текущего сварных соединений, выполненных из стали 09Г2С-12.** В соответствии с программой исследований хладостойкость оценивали по значению ударной вязкости на образцах с круглым (*KCU*) и острым (*KCV*) надрезами. Такая оценка хладостойкости включает требования норм, что действовали при проектировании резервуара [3, 4] и новых норм Украины и России [1, 6, 9]. В нормативе [5] к сталям класса С345, к которому принадлежит сталь 09Г2С-12, для толщины 10...20 мм дополнительно требуется значение ударной вязкости  $KCV \geq 40$  Дж/см<sup>2</sup> при  $T = -20$  °С. Учитывая, что в нормативах [1, 9] сварное соединение по прочности и хладостойкости должно быть равнопрочным основному металлу, программа испытаний для них принята одинаковой.

Для лучшей наглядности результаты испытаний образцов на ударную вязкость *KCU* и *KCV* для основного металла, металла шва и ЗТВ основного и текущего сварных соединений представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов испытания образцов показывает следующее.

При температуре  $T = -40$  °С значение ударной вязкости *KCU* для основного металла исходного (82 Дж/см<sup>2</sup>) и текущего сварного соединения (108 Дж/см<sup>2</sup>) полностью удовлетворяет требованиям норм [1] и ГОСТ 19281-73 [4] ( $KCU \geq 34$  Дж/см<sup>2</sup>), а также ГОСТ 19281-89 [5] ( $KCU \geq 29$  Дж/см<sup>2</sup>).

Значение ударной вязкости *KCV* для исходного сварного соединения при  $T = -20$  °С соответствует

Таблица 3. Механические характеристики основного металла исходного и текущего сварных соединений

Сварные соединения		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Исходное	Образец 1	319,2	498,2	32,6	70,8
	2	324,7	481,9	33,4	68,6
	3	325,1	491,9	34,0	70,2
	4	320,0	488,7	33,6	69,0
Текущее	Образец 1	334,1	533,5	29,6	69,8
	2	334,6	531,9	30,4	70,8
	3	336,7	537,0	26,6	71,8
По ГОСТ 19282-73		≥ 325	≥ 470	≤ 21	—

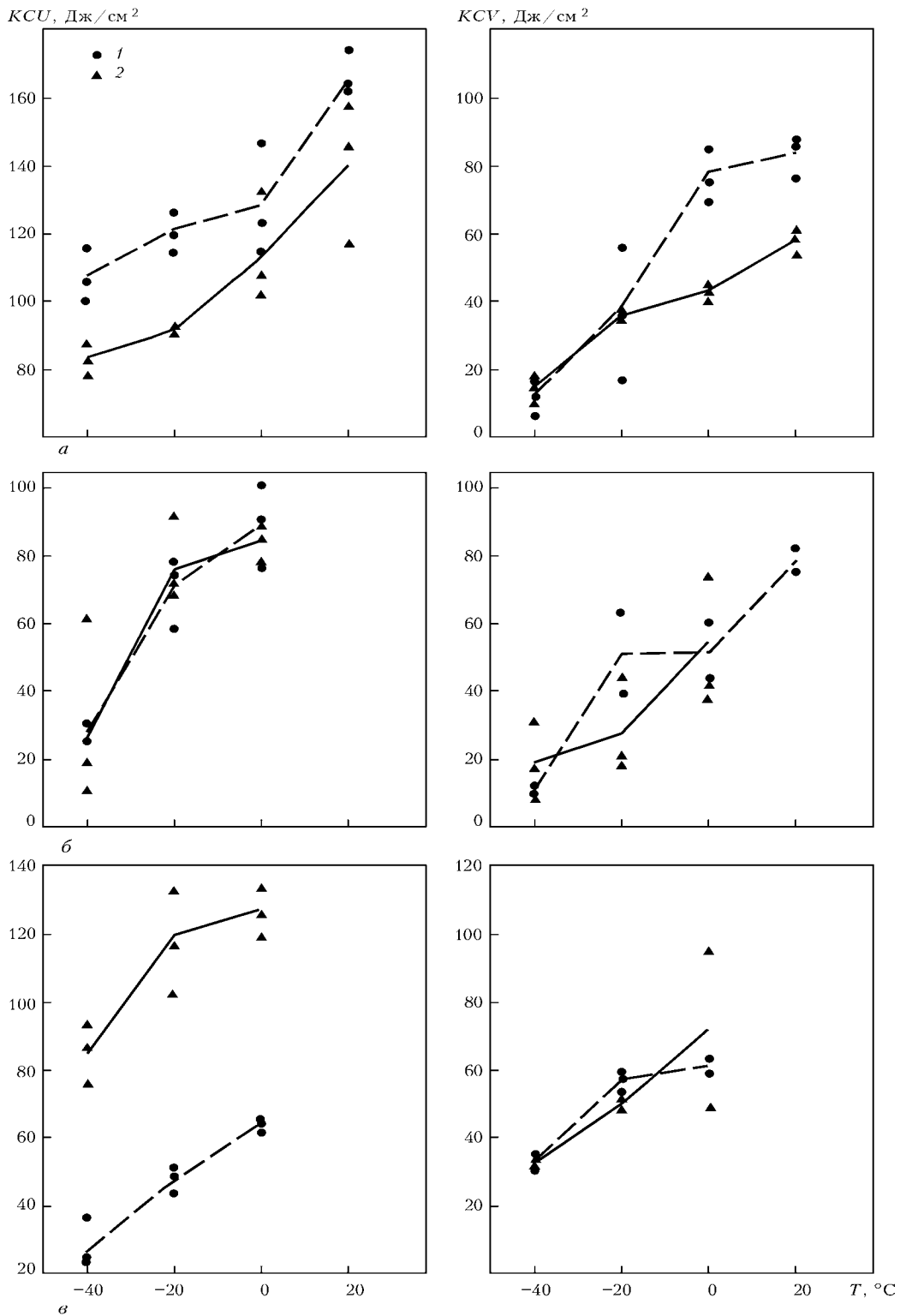


Рис. 2. Результаты испытаний образцов  $KCU$  и  $KCV$  сварного соединения стали 09Г2С: а — основной металл; б — металл шва; в — 3ТВ (1, 2 — соответственно текущее и исходное сварные соединения)

36, при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 18 Дж/см<sup>2</sup>. Для текущего сварного соединения при  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $KCV$  — 39, при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 12 Дж/см<sup>2</sup>.

Основной металл исходного и текущего сварных соединений по значению ударной вязкости  $KCV$  соответствует требованиям норм [1] с учетом действующего ГОСТ 19281–89 [5] (ошибка определения ударной вязкости в лаборатории  $\pm 5\%$ ).

Требованиям норм России [9] ( $KCV = 35$  Дж/см<sup>2</sup> при  $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) оба соединения удовлетворяют только при  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Значение ударной вязкости  $KCU$  металла сварного шва для исходного сварного соединения при  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 77, при  $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 25 Дж/см<sup>2</sup>.

Для текущего сварного соединения при  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $KCU$  — 70, при  $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 29 Дж/см<sup>2</sup>.



Металл сварного шва по значению ударной вязкости  $KCU$  отвечает только требованиям норм Украины [1], где  $T_{расч.} = -20$  °С. Нормам России [3], где  $T_{расч.} = -40$  °С, металл шва не отвечает. Существенного изменения ударной вязкости ( $KCU$ ) сварного шва исходного и текущего сварных соединений не выявлено.

Значение ударной вязкости  $KCV$  для исходного сварного соединения при  $T = -20$  °С — 38, при  $-40$  °С — 20 Дж/см<sup>2</sup>.

Для текущего сварного соединения при  $T = -20$  °С  $KCV$  — 52, при  $-40$  °С — 10 Дж/см<sup>2</sup>.

Металл сварного шва по значению ударной вязкости  $KCV$  отвечает только нормам Украины [1], где при  $T_{расч.} = -20$  °С требуется  $KCV \geq 40$  Дж/см<sup>2</sup>. Нормам России, где при  $T_{расч.} = -40$  °С  $KCV \geq 35$  Дж/см<sup>2</sup> металл шва не отвечает.

Значение ударной вязкости  $KCU$  металла ЗТВ при  $T = -40$  °С для исходного сварного соединения — 85, для текущего — 26 Дж/см<sup>2</sup>.

Значение ударной вязкости  $KCU$  для металла ЗТВ существенно отличается для исходного и текущего сварного соединения. При этом значение  $KCU$  для исходного соединения удовлетворяет требованиям норм Украины [1] и нормативам [3, 5]. Значение ударной вязкости  $KCU$  для металла ЗТВ текущего соединения удовлетворяет всем нормам только при  $T = -20$  °С (расчетная температура для Украины) и не удовлетворяет нормам [1, 9] при  $T = -40$  °С. Полученный разброс значений для исходного и текущего сварных соединений можно объяснить отличием строения металла в сечении по линии сплавления. Местный уход верхнего или нижнего шва с оси стыка на 3...5 мм при отсутствии разделки кромок приводит к тому, что ЗТВ по части сечения будет проходить по зоне перегрева основного металла. Для получения более точного ответа необходимо увеличить количество образцов исходного и текущего сварных соединений.

Значение ударной вязкости  $KCV$  для исходного сварного соединения при  $T = -20$  °С — 50, при  $-40$  °С — 30 Дж/см<sup>2</sup>.

Для текущего сварного соединения при  $T = -20$  °С  $KCV$  — 58, при  $-40$  °С — 32 Дж/см<sup>2</sup>.

Металл ЗТВ исходного и текущего сварных соединений по значению ударной вязкости  $KCV$  отвечает

только нормам Украины [1] (по ГОСТ 12281–89 при  $T_{расч.} = -20$  °С значения  $KCV \geq 40$  Дж/см<sup>2</sup>).

Сравнительные испытания образцов на ударную вязкость ( $KCV$ ) показали, что основной металл, металл шва и ЗТВ удовлетворяют требованиям действующего ГОСТа 19281–89 [5] на сталь 09Г2С-12. Требования норм России [9] (при  $T = -40$  °С  $KCV \geq 39$  Дж/см<sup>2</sup>) не удовлетворяются для всех составляющих соединений. Деградация значений ударной вязкости  $KCV$  на текущих сварных соединениях в сравнении с исходными не обнаружено.

## Вывод

Выполненный объем исследования механических свойств (механические характеристики и значения ударной вязкости) соединений не выявил явной их деградация после длительной эксплуатации исходного и текущего сварных соединений. Результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что заводские вертикальные сварные соединения стали 09Г2С-12, включая основной металл, стенки рулонированных резервуаров, после их длительной эксплуатации в условиях малоциклового нагружения, имеют ресурс работоспособности, удовлетворяющий требованиям норм Украины [1, п.12.4]. Эксплуатация резервуаров должна осуществляться в соответствии с действующими правилами технической эксплуатации.

1. ВБН В.2.2-58.2–94. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов.
2. СНиП П-В.3-72. Несущие и ограждающие конструкции.
3. ГОСТ 19282–73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная.
4. СНиП П-В.3–72. Строительные нормы и правила. — Ч. II, раздел В. Гл. 3. Стальные конструкции, нормы проектирования.
5. ГОСТ 19281–89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
6. ГОСТ 27772–88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.
7. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
8. Оценка состояния металла сварных труб длительно эксплуатируемых газопроводов / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, Л. В. Гончаренко и др. // Там же. — 2003. — № 4. — С. 3–7.
9. ПБ 03-605–03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.