



ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРОВ ПОСЛЕ 20–25 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Ю. БАРВИНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований остаточного ресурса работоспособности заводских вертикальных стыковых сварных соединений стали 16Г2АФ стенки рулонированных резервуаров после 20...25 лет эксплуатации. Изменений механических свойств со временем, включая хладостойкость, не выявлено. Установлено, что исследуемые сварные соединения имеют остаточный ресурс работоспособности, достаточный для их дальнейшей эксплуатации в течение не менее 20-ти последующих лет.

Ключевые слова: резервуары для хранения нефти, сталь 16Г2АФ, заводские сварные стыковые соединения, остаточный ресурс

В ОАО «Укртранснефть» с 1984 г. в эксплуатации находятся четыре резервуара с плавающей крышей для хранения нефти вместимостью по 50 тыс. м³. Резервуары построены с применением рулонных заготовок, сваренных на заводе встык двусторонней автоматической сваркой под слоем флюса из отдельных листов 1,5×6,0 м. Нижние пояса стенки толщиной 17...10 мм выполнены из высокопрочной стали 16Г2АФ (С440). Резервуары эксплуатируются в условиях малоциклового нагружения. Отработав нормативный срок службы, равный 20 годам [1], они в большинстве случаев требуют проведения капитальных ремонтов. В соответствии с действующими нормами Украины [1] необходимо, чтобы резервуары после капитального ремонта имели гарантированный ресурс работоспособности не менее 20 лет при максимальном, технически возможном уровне налива нефти.

С учетом фактического технического состояния резервуаров в процессе капитального ремонта в большинстве случаев замене подлежат днище, центральная часть днища плавающей крыши, весь первый пояс и вертикальные монтажные стыки стенки. После ремонта срок эксплуатации резервуаров в основном определяется остаточным ресурсом вертикальных стыковых сварных соединений стенки.

Оценка ресурса эксплуатации резервуаров после капитального ремонта должна рассматриваться с позиций обеспечения работоспособности в условиях циклического и статического нагружения. Можно принять, что заводские стыковые соединения стенки за прошедшие 20 лет эксплуатации резервуаров прошли $20 \cdot 300 = 6 \cdot 10^3$ циклов слива-налива нефти, где 300 — количество циклов

за 1 год [2]. Естественно, в этом случае возникает вопрос об остаточном ресурсе работоспособности заводских сварных соединений в течение последующего гарантированного срока эксплуатации резервуаров.

В качестве исходных сварных соединений приняты соединения, вырезанные из первого пояса резервуара в процессе его ремонта. Текущие (конечные) сварные соединения получены в лабораторных условиях путем искусственного нагружения исходных соединений на машинах-пульсаторах до количества циклов $N = 1,2 \cdot 10^4$ при амплитуде напряжений $\sigma = (0,1...0,67)\sigma_T$. Полученные образцы в определенной мере отражают работу стенки резервуаров после их эксплуатации в течение последующих 20 лет в системе магистральных нефтепроводов [2].

Расчет на выносливость стыкового сварного соединения для стали класса прочности С440, выполненный в соответствии с указаниями [3] при количестве циклов $N = 10^5$ показал, что максимальное допустимое напряжение для данного сварного соединения $\sigma = 546$ МПа при нормативном значении $\sigma_T = 440$ МПа.

В качестве дополнительной оценки полученных данных относительно прогноза долговечности исходного сварного соединения проведено испытание четырех образцов из этого сварного соединения с указанной выше амплитудой напряжений. Испытания показали, что на базе $N = 10^5$ циклов нагружения образование визуально наблюдаемых трещин не выявлено. Следовательно, с позиций циклического нагружения ресурс эксплуатации резервуаров после капитального ремонта в течение последующих 20 лет обеспечивается.

Перечень подлежащих к выполнению испытаний и исследований для оценки возможного снижения механических свойств сварных соеди-

Таблица 1. Перечень выполненных испытаний и исследований исходных и текущих сварных соединений стали 16Г2АФ

Наименование исследований и испытаний	Исходные сварные соединения			Текущие сварные соединения		
	ОМ	Шов	ЗТВ	ОМ	Шов	ЗТВ
Входной радиографический контроль	+	+	+	+	+	+
Определение химического состава	+	-	-	-	-	-
Определение механических характеристик	$\sigma_T, \sigma_B, \delta_5, \psi$	σ_B	σ_B	$\sigma_T, \sigma_B, \delta_5, \psi$	σ_B	σ_B
Металлографические исследования: исследование микроструктуры; замеры твердости HV	+	+	+	-	+	+
Определение ударной вязкости KCU и KCV (T = +20 °C; 0 °C; -20 °C; -40 °C)	+	+	+	+	+	+

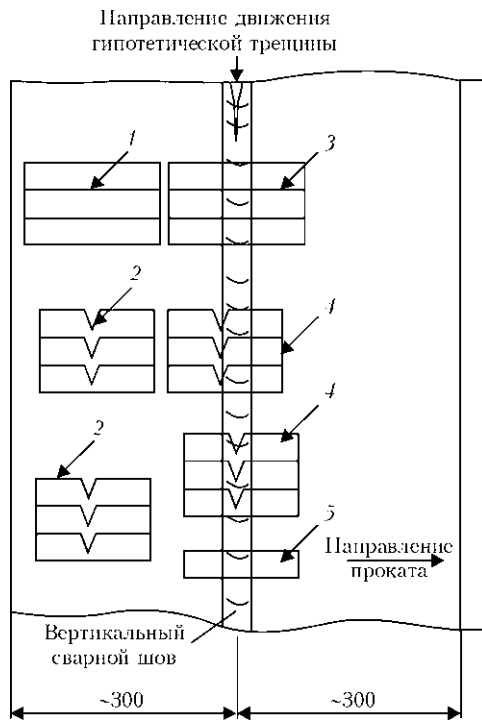


Рис. 1. Схема вырезки образцов из сварного стыка: 1, 3 — образцы для прочностных испытаний соответственно основного металла и сварного соединения; 2, 4 — образцы для определения ударной вязкости основного металла, а также металла шва и ЗТВ с круглым (KCU) и острым (KCV) надрезами; 5 — образцы для металлографических исследований

нений приведен в табл. 1, схема вырезки образцов — на рис. 1.

До начала исследований выполнен радиографический контроль качества сварных соединений на четырех пластинах, принятых в качестве исходного и текущего сварных соединений. Недопустимые дефекты с учетом норм [4] не обнаружены. Механические свойства листового проката из высокопрочной стали 16Г2АФ, поставленного на завод в 1982 г. для изготовления рулонных заготовок, должны были соответствовать нормам [3, 5].

Как видно из табл. 2, химический состав стали 16Г2АФ соответствует ГОСТ 19282–73 [5] и одинаковый для исходных и текущих образцов.

В табл. 3 приведены результаты испытаний исходного и текущего листового проката.

Результаты испытаний на растяжение стыковых сварных соединений без снятия усиления следующие: для исходного соединения $\sigma_B = 640,5...672,3$; текущего — $630,1...650,0$ МПа. Местом разрушения является основной металл. Проведенные испытания показали, что прочностные свойства листового проката удовлетворяют требованиям ГОСТ 19282–73 ($\sigma_B \geq 590$ МПа) [5].

Результаты испытаний исходного и текущего сварных соединений (основной металл, металл

Таблица 2. Химический состав исходного и текущего листового проката стали 16Г2АФ, мас. %

Вид листового проката	C	Si	Mn	Ni	V	S
Исходный образец	0,16	0,39	1,41	0,22	0,11	0,024
Текущий образец	0,18	0,47	1,55	0,21	0,10	0,031
ГОСТ 19282–73	0,14...0,20	0,3...0,6	1,3...1,7	≤ 0,3	0,08...0,14	≤ 0,035

Таблица 3. Механические свойства исходного и текущего листового проката

Вид листового проката	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Исходный образец	490,8...507,7	640,0...663,0	29,0...30,6	65,1...69,1
Текущий образец	421,3...513,2	663,4...680,4	27,6...28,2	68,6...70,8
ГОСТ 19282–73	≥ 440	≥ 590	≥ 20	—



шва и ЗТВ) на ударную вязкость представлены на рис. 2. Отметим, что в нормативе [3], который действовал во время проектирования резервуаров и изготовления рулонных заготовок (1982–1984 гг.), а также в действующем в настоящее время нормативе [6], для листового проката стали 16Г2АФ толщиной 10...32 мм требуется значение ударной вязкости (KCU) не менее 40 Дж/см² при $T = -40$ °С. Учитывая, что хладостойкость листового проката нормы России [7] оценивают более жестко, применяя критерий ударной вязкости KCV , для исследуемых сварных соединений выполнены дополнительно испытания образцов и с V-образным надрезом.

Анализ результатов испытания образцов на ударную вязкость (KCU) не выявил ее изменение в текущем сварном соединении по сравнению с исходным. Отмечено наличие достаточно большого разброса значений, что характерно для стали 16Г2АФ. Установлено, что основной металл, шов и металл ЗТВ в исходном и текущем состоянии удовлетворяют требованиям ударной вязкости (KCU) норм [3], по которым они запроектированы.

Испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом (KCV) также не выявили изменение свойств исходного и текущего сварных соединений. Однако для обоих сварных соединений значения KCV для шва и ЗТВ не удовлетворяли требованиям норматива [7]. Отметим, что с учетом характеристик свариваемости и хладостойкости действующими нормативами [1, 7] сталь 16Г2АФ не рекомендуется к применению для нефтяных резервуаров и может быть успешно заменена сталями нового поколения 10Г2ФБ [7] или 06Г2Б (С440) [8].

В дополнение к полученным результатам относительно механических свойств сварных соединений стали 16Г2АФ выполнены металлографические исследования исходных и текущих сварных соединений. Основной металл представляет собой ферритно-перлитную смесь с ярко выраженной структурой проката. Балл зерна металла соответствует № 8, твердость феррита $HV 0,05 = 210...221$, перлита — $HV 0,05 = 244$. Основной металл и ЗТВ

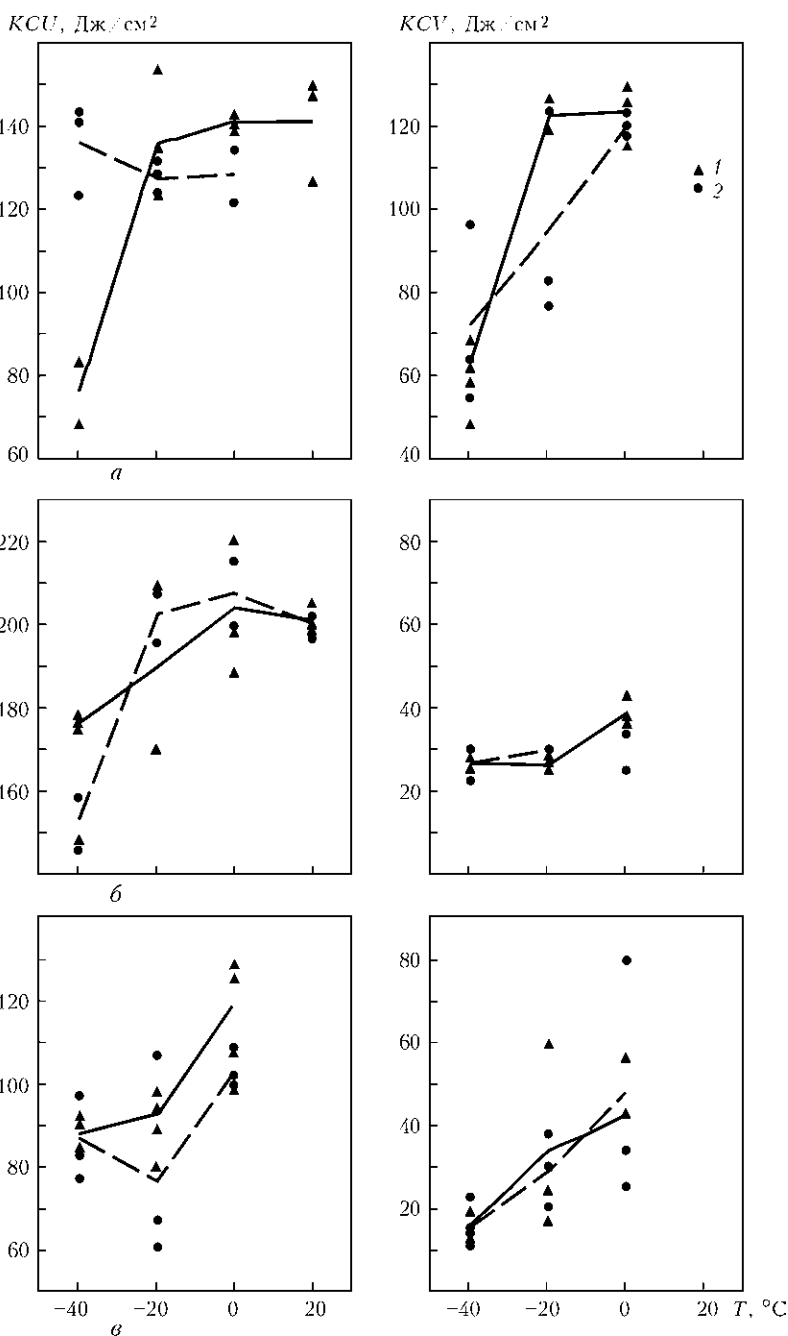


Рис. 2. Результаты испытаний образцов исходного (1) и текущего (2) сварного соединения из стали 16Г2АФ на ударную вязкость с круглым (KCU) и острым (KCV) надрезами: а — основной металл; б — металл шва; в — ЗТВ

сварного соединения отличаются наличием значительного количества сульфидных строчечных включений как вдали от шва, так и в непосредственной близости от линии сплавления.

Во время металлографических исследований выполнена и косвенная оценка трещиностойкости сварных соединений с учетом наличия в швах микровключений шлака и несплавления в околошовной зоне (рис. 3, 4). Из результатов исследований видно, что после искусственного малоциклового нагружения, равнозначного 20 годам эксплуатации резервуаров, на концах трещиноподобных микровключений зарождения новых и

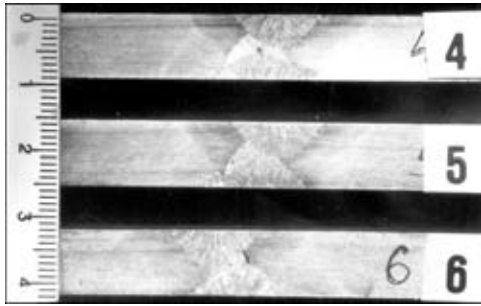


Рис. 3. Макрошлифы сварных стыковых заводских соединений стали 16Г2АФ с несплавлениями и включениями шлака

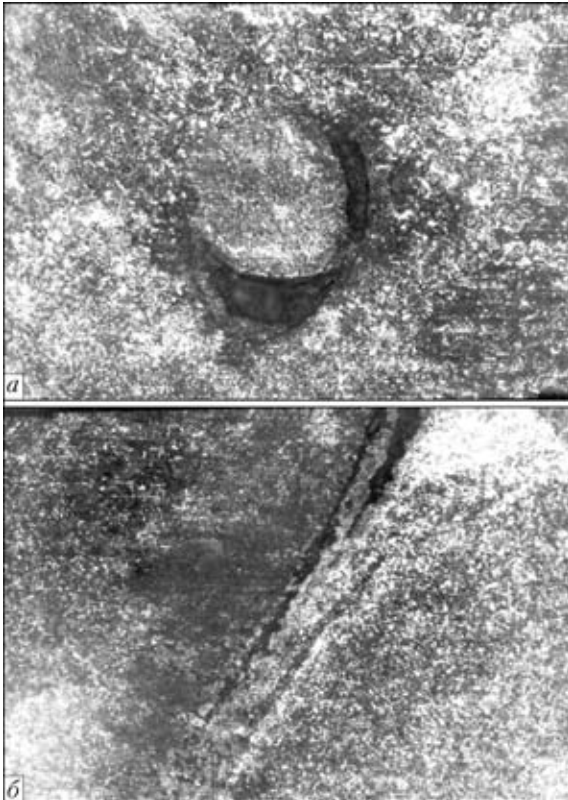


Рис. 4. Микроструктура ($\times 100$) металла шва (а) и околошовной зоны текущего (б) сварного соединения (после $N = 1,2 \cdot 10^4$ циклов) стали 16Г2АФ

развития существующих микротрещин не выявлено. Однако наличие в сварных соединениях трещиноподобных микровключений и непроваров дает основание предполагать, что в швах могут быть и подобные макровключения, развитие которых может наблюдаться со временем. Для обес-

печения гарантированной работоспособности таких сварных соединений предлагается при каждом полном обследовании резервуаров выполнять ультразвуковой или радиографический контроль качества заводских вертикальных швов с наложением только вертикальных рентгеновских пленок на пяти нижних поясах стенки.

Необходимость выполнения предлагаемого объема контроля подтверждается выводами по обследованию ряда резервуаров вместимостью 20 и 50 тыс. м³. Анализ результатов показывает, что при каждом очередном контроле заводских швов выявляются недопустимые дефекты, подлежащие исправлению.

Выводы

1. Заводские вертикальные соединения стенки резервуаров, построенных с применением рулонных заготовок из стали 16Г2АФ, после 20–25 лет эксплуатации в режиме малоциклового нагружения сохранили высокую работоспособность и их остаточный ресурс обеспечивает дальнейшую безопасную эксплуатацию резервуаров в течение не менее 20 лет, что отвечает требованиям норм Украины для новых резервуаров.

2. Во время периодического полного обследования резервуаров необходимо выполнять ультразвуковой и радиографический контроль вертикальных заводских швов не менее, чем на пяти нижних поясах стенки.

1. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів. — Чинний з 01.10.1994.
2. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–5000 куб. м. — Введ. 21.06.04.
3. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. — Введ. 01.01.1982.
4. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. — Введ. 01.06.1988.
5. ГОСТ 19282-73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. — Введ. 01.01.75.
6. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. — Введ. 01.01.89.
7. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — Введ. 09.07.2003.
8. ТУ У 27. 1-05416923-085:2006. Прокат листовой свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения. — Введ. 02.04.2007.

The paper presents the results of experimental investigations of the residual service life of shop vertical butt welded joints of 16G2AF steel on a coiled tank wall after 20-25 years of operation. No changes of mechanical properties with time were found, including their cold resistance. It is established that the studied welded joints have the residual service life sufficient for their further operation for not less than 20 more years.

Поступила в редакцию 16.03.2009