ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ**EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONSTRUCTIVE-SIMILAR SAMPLES FOR CYCLIC DURABILITY****Р.Г. Ризванов**
Rif G. RizvanovУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum Technological
University, Ufa,
Russian Federation**А.И. Биккинин**
Aidar I. BikininООО «Газпром-Инвест»,
г. Санкт-Петербург,
Российская ФедерацияGazprom-Invest LLC,
Saint-Petersburg,
Russian Federation**М.З. Ямилев**
Marat Z. YamilovНТЦ ООО «НИИ Транснефть»,
г. Уфа
Российская ФедерацияScientific and Technical Center,
Transneft R&D LLC,
Ufa, Russian Federation

Эффективность ресурсных испытаний характеризует их способность обеспечивать достоверную проверку качества изделия, обеспечивать эквивалентность стендовых и эксплуатационных условий. Испытания сварных соединений на циклическую усталость, проводимые в соответствии с ГОСТ 25.502-79, позволяют с заданным уровнем вероятности определить ресурс сварного соединения по результатам испытаний стандартных образцов. Для определения долговечности сварных соединений нестандартной формы выполняется перерасчет результатов по аналитической зависимости, что не всегда позволяет получить достоверный результат.

Альтернативным методом является проведение испытаний конструктивно-подобных образцов, когда форма образцов и схема приложения нагрузок позволяют воспроизвести напряженно-деформированное состояние сварного соединения, максимально близкое к условиям эксплуатации.

Для реализации возможности воспроизведения эксплуатационных нагрузок в стендовых условиях с применением конструктивно-подобного образца проведено численное моделирование.

Результаты расчетов показали, что деформации напряжения, возникающие в образцах при испытании на усталость, не в полной мере соответствуют напряженно-деформированному состоянию уторного узла резервуара в условиях эксплуатации. Максимальные эквивалентные напряжения в уторном узле при толщинах днища и стенок 9 мм сосредоточены в металле стенки, в то время как в испытательном образце при тех же толщинах область максимальных напряжений сосредоточена в окрайке, что подтверждается результатами натурных испытаний: разрушение образца происходит по линии сплавления сварного шва и окрайки. Для повышения достоверности результатов ресурсных испытаний на основе результатов численного моделирования разработаны усовершенствованная конструкция испытательного образца и схема его нагружения, реализованная через специальную оснастку.

The effectiveness of resource tests characterizes their ability to provide reliable quality control of the product, ensure the equivalence of bench and operating conditions. Tests of welded joints for cyclic fatigue, conducted in accordance with State Standard 25.502-79, allow to determine the service life of a welded joint with the given level of probability according to the results of tests of standard samples. To determine the durability of welded connections of non-standard form, the results are recalculated according to the analytical dependence, which does not always allow obtaining a reliable result.

Ключевые словаресурс,
механические испытания,
долговечность, надежность,
сварной шов, резервуар**Key words**resource, mechanical tests,
durability, reliability,
welded seam, oil tank

An alternative method is to carry out tests of constructively similar samples, when the shape of the samples and the scheme of application of loads make it possible to reproduce the stress-strain state of the welded joint that is the closest to the operating conditions.

To realize the possibility of reproducing operational loads in bench conditions with the use of a constructive-like sample, numerical simulation was carried out.

The results of the calculations showed that stress strains arising in the samples during the fatigue test do not fully correspond to the stress-strain state of the welded rim of the reservoir under operating conditions.

The maximum equivalent stresses in the welded rim at bottom and wall thicknesses of 9 mm are concentrated in the wall metal, while in the sample at the same thicknesses the area of maximum stresses is concentrated in the margin, which is confirmed by the results of full-scale tests: the sample breaks down along the fusion line of the weld and margins. To improve the reliability of the results of resource tests based on the results of numerical simulation, there were developed an improved design of the test sample and its loading scheme, realized through a special tooling.

Целью проведения испытаний на циклическую усталость является определение ресурса сооружения (его элементов). Для получения достоверных результатов необходимо подбирать образцы и величину нагрузки таким образом, чтобы напряжения и деформации, возникающие в образце, соответствовали эксплуатационным. В качестве критерия оценки эквивалентности в настоящей работе принято распределение главных напряжений на внутренней поверхности сопряжения стенки и дна вертикального стального резервуара (в зоне возникновения максимальных растягивающих напряжений).

Для оценки деформаций и напряжений, возникающих в уторном узле в процессе эксплуатации, выполнен численный расчет резервуара под действием собственного веса и гидростатического давления продукта при условии опирания дна на жесткое основание [1]. Результаты расчета показали наиболее нагруженные участки, которые могут являться очагами разрушения [2]. Значительные растягивающие напряжения, наиболее опасные с точки зрения обеспечения надежности сварного соединения, сосредоточены на внутренней поверхности, вблизи линий сплавления сварного шва с металлом окрайки и стенки [3–5]. Причем при одинаковой толщине окрайки и первого пояса стенки максимальные напряжения σ_1 действуют в стенке.

Таким образом, при циклических испытаниях разрушение образца при $S_{\text{дн}} = S_{\text{ст}}$ должно происходить не по днищу, а по стенке. Разрушение образцов по днищу обусловлено пластической деформацией пластины, представляющей участок дна, что компенси-

рует часть возникающих напряжений в зоне уторного узла.

Соотношение величины напряжений в точках сопряжения сварного шва с дном и стенкой зависит от направления приложения нагрузки к образцу. В предлагаемой конструкции испытательного образца при выбранной схеме нагружения обеспечивается напряженно-деформированное состояние, эквивалентное возникающему в резервуаре. Для практической реализации предложенной схемы приложения нагрузки разработана оснастка, позволяющая проводить ресурсные испытания на универсальном оборудовании (рисунок 1).

Проведение испытаний

Испытания проводились на универсальной испытательной машине фирмы «SCHENCK TREBEL» системы Hydropuls серии PSA10 (универсальная машина высокой точности, с максимальным усилием 100 кН (рисунок 2). Диапазон частот до 100 Гц, максимальный ход поршня 180 мм) двух серий образцов: 1 — конструкции, предложенной в [6]; 2 — предлагаемой конструкции со специальной оснасткой.

Параметры испытательной машины при проведении эксперимента: $P_{\text{max}} = 30$ кН, $P_{\text{min}} = 6$ кН, $P_{\text{ст}} = 18$ кН, частота $f = 7$ Гц.

Материал изготовления образцов: сталь 09Г2С (таблица 1).

Сварка произведена полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа проволокой Св08Г2С толщиной 1,2 мм.

Геометрические характеристики образцов приведены на рисунке 3.

Рисунок 1. Оснастка для проведения испытаний

а) б)
F — направление приложения усилий
а) конструкция, предложенная в работе [6]; б) предлагаемая конструкция

Рисунок 2. Испытательные образцы

Таблица 1. Характеристики стали 09Г2С

Характеристика	Значение
Модуль упругости E, МПа	$2,06 \times 10^5$
Коэффициент Пуассона ν	0,28
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	330
Временное сопротивление σ_b , МПа	500
Предел текучести σ_t , МПа	283
Относительное сужение при разрыве ψ , %	0,65

Рисунок 3. Образец для проведения испытаний

Проведение лабораторного эксперимента представлено на рисунке 4.

Результаты

В ходе испытаний разрушение всех образцов серии 1 произошло по линии сплавления сварного шва с днищем. Разрушение всех образцов серии 2 произошло по линии сплавления сварного шва со стенкой, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования в части локализации максимальных главных напряжений (рисунок 5).

Рисунок 4. Лабораторный эксперимент по определению циклической выносливости уторного сварного соединения

а)

а) конструкция, предложенная в работе [6]; б) предлагаемая конструкция

б)

Рисунок 5. Образцы после испытаний на циклическую выносливость с результатами численного моделирования

Для повышения ресурса и точности монтажа уторного сварного соединения существует технология предварительного обратного выгиба окрасочного листа. Для возможности верификации этого были проведены сравнительные испытания на циклическую выносливость уторного сварного соединения, изготовленного по существующей технологии (приварка стенки к днищу без деформации окрасочного листа) и изготовленного по технологии с предварительным обратным выгибом (предварительный обратный выгиб окрасочного листа согласно [7]). Для эксперимента были изготовлены образцы из стали 09Г2С с толщинами согласно таблице 2.

Таблица 2. Толщины стенки и окрайки в расчетных образцах

Номер образца	1	2	3	4	5
Толщина 1 пояса стенки SCT, мм	9	10	13	22	28
Толщина окрайки днища SDH, мм	9	9	9	14	16

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биккинин А.И., Ризванов Р.Г. Определение оптимальных параметров формы и размеров образца уторного узла резервуара для проведения механических испытаний на долговечность // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 4. С. 137–142.
2. Лисин Ю.В., Махутов Н.А., Неганов Д.А., Варшицкий В.М. Комплексный анализ запасов прочности трубопроводов и базовых механических свойств трубных сталей // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1. С. 30–38.
3. Андреев Я.М. Обеспечение эксплуатационной надежности резервуаров Севера путем повышения выявляемости плоскостных дефектов: дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2017. 129 с.
4. Землянский А.А., Вертынский О.С. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7 С. 40–44.
5. Скорняков А.А., Зарипов М.З., Ибрагимов И.Г., Карпов А.Л., Вержбицкий К.Д. Исследование конструктивных элементов уторного шва резервуаров // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 157–161.
6. Семин Е.Е. Оценка долговечности уторных узлов вертикальных стальных резервуаров в процессе эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 146 с.
7. Файрушин А.М., Четверткова О.В., Ямилев М.З., Биккинин А.И. Совершенствование технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 6. С. 84–87.

Для образцов с предварительным обратным выгибом имитацию веса стенки производили при помощи прессы. Высота предварительного обратного прогиба выбиралась в размере 3 мм.

В результате экспериментов получены результаты, подтверждающие положительные свойства обратного выгиба. Циклическая выносливость уторного сварного соединения возросла в среднем на 13 %.

Выводы

1. Проведенные эксперименты на цикловую усталость показали сходимость полученных данных с численным моделированием, что позволило с более высокой достоверностью определять ресурс уторного сварного соединения по сравнению с существующими испытательными образцами.

2. В результате испытаний на цикловую выносливость уторных сварных соединений, изготовленных с использованием технологии предварительного обратного прогиба окрасочного листа, установлено, что ресурс таких соединений повышается в среднем на 13%.

REFERENCES

1. Bikkinin A.I., Rizvanov R.G. Opredelenie optimal'nykh parametrov formy i razmerov obraztsa utornogo uzla rezervuara dlya provedeniya mekhanicheskikh ispytaniy na dolgovechnost' [Optimal Sample Shape and Size Determination of Tank Junctional Unit for Mechanical Endurance Tests]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 4, pp. 137–142. [in Russian].
2. Lisin Yu.V., Makhutov N.A., Neganov D.A., Varshitskii V.M., Kompleksnyi analiz zapasov prochnosti truboprovodov i bazovykh mekhanicheskikh svoystv trubnykh staley [Comprehensive analysis of the pipelines safety and basic mechanical properties of the pipe steels]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov — Science & Technologies Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2017, No. 1, pp. 30–38. [in Russian].
3. Andreev Ya.M. Obespechenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti rezervuarov Severa putem povysheniya vyavlyayemosti ploskostnykh defektov: dis. kand. tekhn. nauk [Ensuring of Operational Reliability of the Tanks of the North by Improving the Detection of Planar Defects: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Yakutsk, 2017. 129 p. [in Russian].
4. Zemlyanskii A.A., Vertynskii O.S. Opyt vyavleniya defektov i treshchin v krupnorazmernykh rezervuarakh dlya khraneniya uglevodorodov [Experience of localization of faults and cracks in large size tank beds for carbone storage]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal — Magazine of Civil Engineering*, 2011, No. 7, pp. 40–44. [in Russian].
5. Skorniyakov A.A., Zaripov M.Z., Ibragimov I.G., Karpov A.L., Verzhbitskii K.D. Issledovanie konstruktivnykh

elementov utornogo shva rezervuarov [Research of the Constructive Elements of the Tank's Rim Weld]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2014, Vol. 12, No. 4, pp. 157–161. [in Russian].

6. Semin E.E. *Otsenka dolgovechnosti utornykh uzlov vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov v protsesse ekspluatatsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Evaluation of Durability Utor Nodes Vertical Steel Tanks in the Process of Operation: Cand. Engin. Sci. Diss]. Moscow, 2012. 146 p. [in Russian].

7. Fairushin A.M., Chetvertkova O.V., Yamilov M.Z., Bikkinin A.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya utornogo uzla stal'nogo vertikal'nogo rezervuara* [Improvement of Manufacturing Technology of the Rim Weld of a Vertical Steel Tank]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov — Science & Technologies Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, No. 6, pp. 84–87. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Ризванов Риф Гарифович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rif G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Head of Technology of Oil Instrumentation Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rifriz@mail.ru

Биккинин Айдар Илшатович, инженер, ООО «Газпром-Инвест», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Aidar I. Bikkinin, Engineer, Gazprom-Invest LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: abikkinin@invest.gazprom.ru

Ямилев Марат Замирович, канд. техн. наук, начальник службы, НТЦ ООО «НИИ Транснефть», г. Уфа, Российская Федерация

Marat Z. Yamilov, Candidate of Engineering Sciences, Head of Service, Scientific and Technical Center, Transneft R&D LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: marat-yamilov@mail.ru