

THE STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF CHANGES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE FILLET WELD REGION OF A RESERVOIR DURING CYCLIC LOADING USING SMALL PUNCH TEST SPECIMENS

*Ulugbek Abduraimovich Juraev, Emil Nailevich Gabidullin,
Ramis Rinatovich Valiev, Roman Germanovich Babichev*

Ufa State Petroleum Technical University, Kosmanavtov str. 1, Ufa, 450064, Russia
info@rusoil.net

ABSTRACT

The study investigated the fillet weld region of vertical steel reservoirs using the Small Punch Test (SPT) method. The main focus was on determining material characteristic parameters such as fracture, elongation, and creep, as well as finding optimal method parameters. The analysis aimed to enhance the safety of using vertical steel reservoirs in hydrocarbon extraction, transportation, and processing, as accidents involving these reservoirs can have severe consequences. The research revealed that the Small Punch Test method is effective, and further investigations should be conducted not only on the fillet weld zones but also on the base material, including the heat-affected zones. It was recommended to surface treat the specimens to remove wire marks, as polished surfaces with lower roughness values showed higher correlation with mechanical characteristics compared to rough unpolished specimens. The study concluded that testing specimens smaller than 1 mm is not accurate, and specimens larger than 1 mm should be chosen, considering the deformation capacity of the equipment. Additionally, the possibility of increasing the diameter of specimens without compromising their stability should be explored to improve the accuracy of diagnostic testing. However, finding the optimal balance between specimen size and testing accuracy requires further calculations. The cutting of specimens for SPT testing should be performed using methods that do not introduce internal stresses, such as electroerosion methods followed by grinding the cutting plane. This is crucial to avoid erroneous results caused by the deformation of the edge layer. In summary, this research provides valuable recommendations for using the Small Punch Test method to investigate vertical steel reservoirs and enhance their safety.

KEYWORDS

Fillet weld; steel reservoir; Small Punch Test method; fracture; elongation; creep.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОЙСТВ СВАРНОГО ШВА В УТОРНОМ УЗЛЕ РЕЗЕРВУАРА В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ SMALL PUNCH TEST-ОБРАЗЦОВ

*Улугбек Абдураимович Джураев, Эмиль Наилевич Габидуллин,
Рамис Ринатович Валиев, Роман Германович Бабичев*

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Косманавтов, 1
info@rusoil.net

АННОТАЦИЯ

Проведено исследование уторного узла стального резервуара с использованием метода малых образцов. Основной упор делается на определение параметров характеристики материала: разрушения, растяжения, ползучести, а также на поиск оптимальных параметров метода. Анализ проводился с целью повышения безопасности использования вертикальных стальных резервуаров при добыче, транспорте и переработке углеводородного сырья, т.к. аварии резервуаров могут привести к тяжелым последствиям. Установлено, что метод малых образцов является эффективным и следует проводить дополнительные исследования не только из зон уторного шва, но и из основного материала, включая зоны термического влияния. Показано, что исследование дисковых образцов толщиной менее 1 мм не надежны ввиду малого репрезентативного объема, ввиду этого для испытаний следует выбирать образцы толщиной более 1 мм, учитывая при этом деформирующую способность оснастки. Проведены доводы необходимости исследования возможности увеличения диаметра образцов для повышения точности диагностических испытаний, избегая при этом создания концентраторов напряжений в локациях вырезки. Продемонстрирована целесообразность использования способов вырезки образцов, не создающих внутренних напряжений, например, электроэрозионных методов с последующей шлифовкой плоскости резки, чтобы избежать неверных результатов из-за методов деформирующего краевого слоя. Обобщая, данное исследование представляет важные рекомендации для использования метода малых образцов для исследования вертикальных стальных резервуаров и повышения их безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Уторный узел; стальной резервуар; метод малых образцов; разрушение; растяжение; ползучесть.

Введение

Вертикальные стальные резервуары являются неотъемлемой частью парка оборудования добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья. Резервуары представляют собой сосуды различных размеров, предназначенные для накопления, хранения, выполнения технологических операций и учета нефти и нефтепродуктов. По форме резервуары выпускаются цилиндрическими, вертикальными и горизонтальными, сферическими.

Во многих случаях аварии резервуаров сопровождаются взрывами, пожарами и неконтролируемыми разливами хранимого продукта, что приводит к тяжелым последствиям.

Уторный шов является одним из наиболее опасных участков, вследствие его низкой деформационной способности, из-за чего происходят аварийные ситуации, которые влекут за собой потери.

Сварные соединения с фаской представляют собой быстрый и эффективный метод для соединения стальных пластин и широко используются в гражданском строительстве, таком как здания или мосты, а также в морских конструкциях, таких как жесткие элементы на судах и других плавучих сооружениях. В некоторых случаях такие сварные соединения подвергаются повторному нагружению, что может привести к усталостному разрушению. Большинство случаев усталостного разрушения документированы в области высокоцикловой усталости, связанной с большим количеством нагрузочных циклов, как отмечено в обзорной статье Мэддокса [1]. Однако при экстремальных условиях нагрузки могут возникать большие упруго-пластические деформации, характеризующиеся повторными движениями в пластической области материала, вызывающими низкотемпературную усталость при относительно небольшом ко-

личестве нагрузочных циклов. Шёт-Томсен и Андреасен [2] исследовали низкотемпературную усталость сварных фасок из высокопрочной свариваемой стали и пришли к выводу, что предел прочности при растяжении может быть использован в качестве основы для разработки кривых усталости на основе статических данных о материале. Кориглиано и др. [3] представили экспериментальное и численное исследование сварных фасок при низкотемпературной усталостной нагрузке, предоставив информацию для разработки моделей, и согласно экспериментальным наблюдениям они отметили, что область с критическими деформациями простирается на поверхности основного материала. В последующей публикации Кориглиано и др. [4] использовали подход с оценкой напряжений в уступе для прогнозирования срока службы сварных фасок при низкотемпературной усталости, используемых в корабельных конструкциях. Saiprasertkit и др. [5] исследовали влияние несоответствия прочности основного металла и сварного металла, которое чаще встречается в стали повышенной прочности, и пришли к выводу, что воздействие несоответствия становится более интенсивным при низкотемпературной усталости и незначительным при высокотемпературной усталости.

Еще одним более специфическим применением сварных фасок является сварное соединение неармированных жидкостных хранилищ, в частности, сварное соединение основной пластины резервуара с обшивкой. Когда неармированный резервуар подвергается сильным сейсмическим воздействиям, момент опрокидывания, вызванный в основном колебаниями содержимого, и соответствующее гидродинамическое давление на стенку резервуара могут вызывать повторное поднятие основной пластины резервуара [6, 7]. Основная пластина значительно тоньше обшивки резервуара, и это повторное поднятие может привести к низкотемпературной усталости. Ранняя публикация Возняк и Митчелл [8] предложила модель пластины-

полосы, описывающую механизм поднятия с акцентом на пластическую деформацию основной пластины. Более подробная аналитическая модель поднятия была предложена Леоном и Каузелем [9], в то время как Фишер и др. [10], исследуя повышение резервуара, пересмотрели механизм поднятия упругой балки, подвергнутой одновременному воздействию силы, направленной вверх, и равномерно распределенной нагрузки. В более новых публикациях Малхотра и Велетсос представили модель пластины-полосы [11] и аксиметричную модель [12] в попытке описать механизм поднятия и соответствующую деформацию основной пластины. Эти модели стали основой глобальной модели для динамического ответа поднимающегося резервуара, представленной в последующей публикации Малхотры и Велетсос [13]. Недавно, Бора и др. [14] и Спритцер и Гюзей [15] исследовали отклик жидкостного хранилища, подвергаемого сейсмической нагрузке, и сравнили амплитуду поднятия структуры резервуара с доступными проектными нормами. Кроме того, Танигути и др. [16] рассчитали поднятие с использованием упрощенного анализа и сравнили численные результаты с измерениями длины выдергивания якорного болта закрепленного резервуара. Вопрос о тестировании на остаточный ресурс мест где имеет место локализация внутренних напряжений резервуаров является актуальным уже на протяжении большого количества времени. Одним из перспективных способов для этого является тестирование микрообразцов. При большинстве прикладных либо практических задач применение микрообразцов при проведении механических испытаний является незаменимым при анализе процессов эксплуатации, экспертизе дефектов либо разрушенных деталей конструкции, когда невозможно получить полноразмерные образцы в соответствии с действующим стандартом. Причинами могут быть небольшие размеры детали, сложная форма, особые свойства (например, закаленная или упрочненная поверхность).

Использование микрообразцов является оправданным при варианте быстрого поиска области оптимума и небольшом объеме испытываемого материала при значительном начальном количестве вариантов химического состава или режимов термической обработки с последующей проверкой свойств материалов из найденной области на макрообразцах по действующему стандарту.

Суть метода состоит во вдавливании индентора в образцы небольшого размера вплоть до их разрушения.

1. Материал и методики

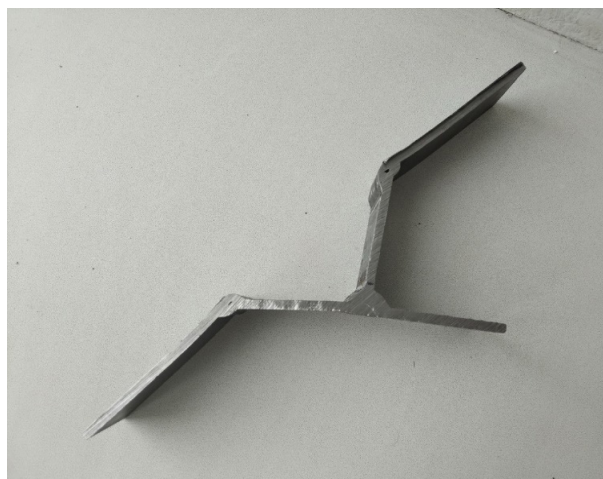
В качестве объекта исследования был использован модельный образец уторного шва (рис. 1).

Первый этап исследования заключался в изготовлении образцов, были сделаны вырезки образцов из сварных швов модели уторного узла, изготовлена конструкция для проведения испытаний образцов, материал конструкции – легированная сталь 30ХГСА.

Для вырезки образцов использовался электроэрозионный станок АРТА-120.

Для оценки механических характеристик была использована сервогидравлическая испытательная система модели 8801. Система может проводить испытания на разрыв, сжатие, изгиб, растяжение, сдвиг и другие типы нагрузок.

После разделения уторного шва на 2 части, вырезались круглые образцы диаметром 5 мм с правой части уторного шва, а с левой части плоские как показано на рис. 2. Также образцы были отшлифованы, так как по проанализированным статьям, отшлифованные поверхности, с меньшим значением шероховатости показывали более высокую степень корреляции механических характеристик по сравнению с грубыми нешлифованными образцами. Для изготовления оснастки были разработаны чертежи для проведения испытаний круглых SPT образцов. Чертежи разработанной конструкции показаны на рис. 3, а, б верхняя и нижняя часть.



а



б

Рис. 1. Модельный образец уторного узла

Fig. 1. Model sample of the welding knot

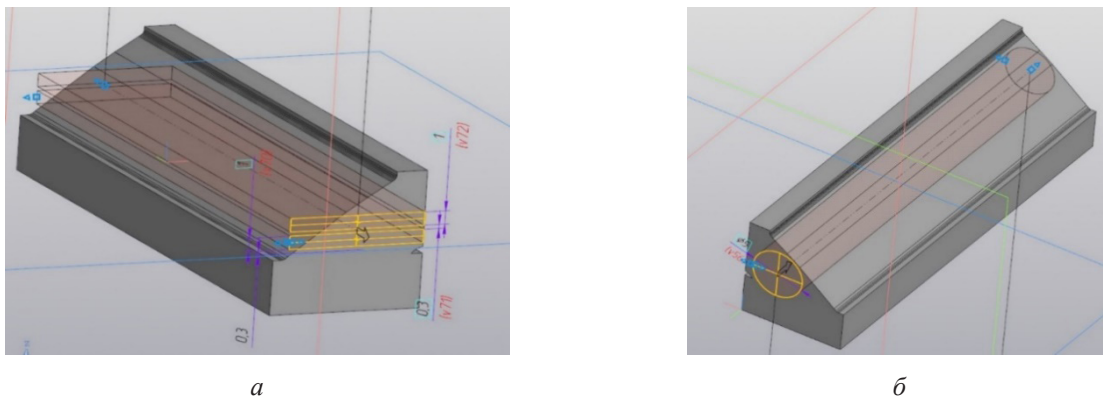


Рис. 2. Схема вырезки образцов из сварного шва уторного узла

Fig. 2. Scheme of cutting samples from the welded seam of the chime assembly

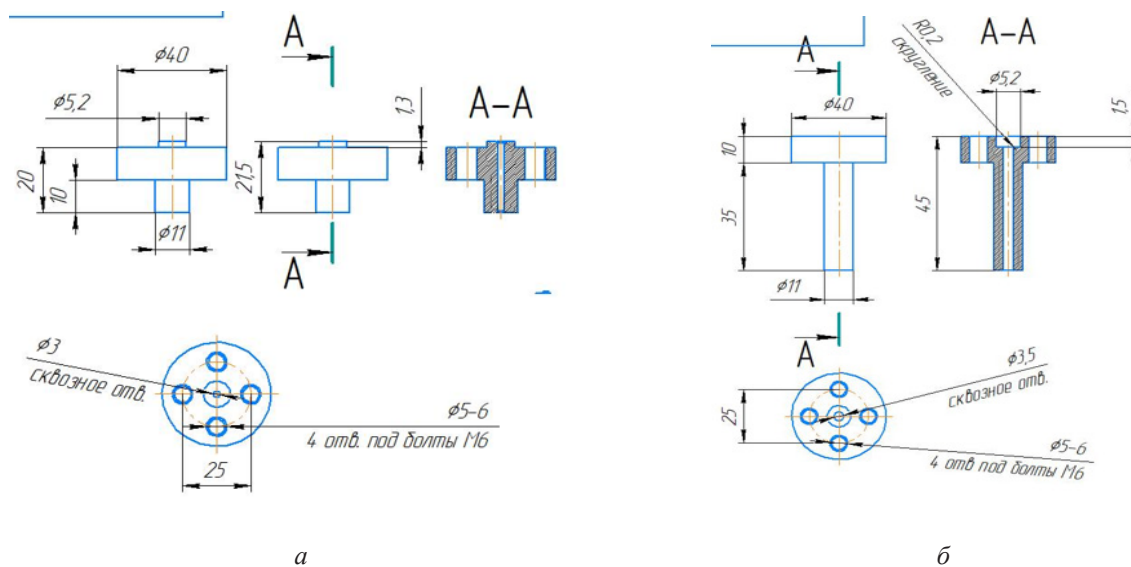


Рис. 3. Чертеж разработанной конструкции для проведения испытаний круглых компактных образцов конструкции

Fig. 3. Drawing of the developed design for testing round compact design samples

Перед проведением испытаний проводилась настройка системы Instron 8801 выбирался вид испытания, выполнялась настройка скорости пробивки и нагрузки, чтобы конструкция не разрушилась из-за сильной нагрузки или высокой скорости. С помощью новой конструкции производится испытание деформирования образца до его разрушения. Следует отметить, что испытания проводились при минимальном значении скорости нагружения мм/мин для предотвращения нагрева образцов. Это существенно повышало время испытаний.

2. Результаты и обсуждение

В ходе исследования были построены зависимости механических характеристик SPT образцов с различной толщиной от уровня накопленных повреждений при 0,15, 0,23, 0,38, 0,62, 0,77, 0,85, 0,92 и 1 циклах усталостного нагружения. На рис. 4, а показаны предел текучести методом SPT от уровня накопленных повреждений с различными толщинами образцов, на рис. 4, б предел текучести, полученные путем растяжения плоских образцов толщиной 1 мм от уровня накопленных повреждений.

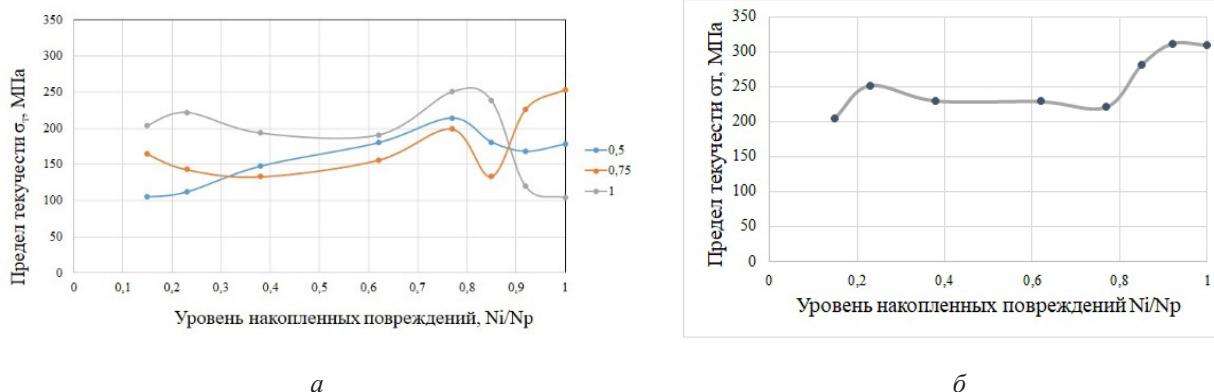


Рис. 4. Пределы текучести от уровня накопленных повреждений

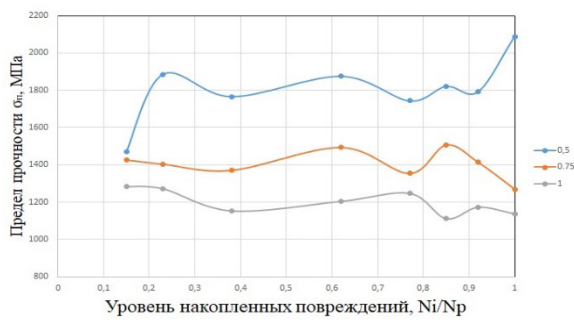
Fig. 4. Yield strength versus level of accumulated damage

При сравнении пределов текучести образцов испытанные различными методами, а именно методом растяжения плоских образцов и SPT методом, где в обоих случаях толщина образца составляла 1 мм, видно, что по порядку величины предел текучести демонстрирует неплохое совпадение вплоть до уровня накопленных повреждений около $Ni/Np = 0,7$ и он меняется в примерном интервале от 200–250 МПа. При повышении $Ni/Np = 0,8$ начинаются значительные осцилляции у предела текучести в случае метода SPT, а подобных осцилляции в случае растяжения плоских образцов не наблюдается.

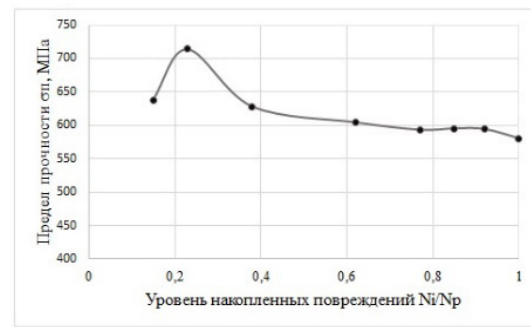
При сравнении образцов, испытанных методом SPT различной толщины, можно отметить, что на начальном этапе наблюдаются незначительные отклонения значений одного положения и в некоторых случаях видно, что уровень накопленных повреждений для более толстого образца толщиной 0,75 мм меньше чем для образца толщиной 0,5 мм. Это может быть связано с тем, что маленькая толщина образцов не дает достаточного репрезентативного объема и присутствующие в них локальные концентрации дефектов могут оказывать влияние на полученные значения. В пользу этого утверждения говорит тот факт, что для образцов толщиной 1 мм, наблюдаются самые высокие значения предела текучести, как и было ожи-

даемо. При достижении уровня накопленных повреждений 0,7 Ni/Np наблюдаются максимальные значения пределов текучести, после чего во всех случаях предел текучести идет на спад. С помощью методов оптической микроскопии и других методов определения структуры данный уровень накопленных повреждений соответствует появлению и срагиванию трещины в материале, что приводит к перераспределению и локализации энергии деформации поступающих в материал в процессе циклических воздействий. Следует отметить, что образцы вырезаны из сварного шва, которые являются более прочным по сравнению с основным материалом. Точное объяснение поведения предела текучести после точки перегиба, требует дополнительных исследований методами точной микроскопии, однако так как целью данной работы является диагностика сварного шва в целом, нельзя сказать, что данное исследование в рамках проделанной работы является целесообразным.

На рис. 5, а показаны предел прочности методом SPT от уровня накопленных повреждений с различными толщинами образцов, на рис. 5, б предел прочности, полученные путем растяжения плоских компактных образцов толщиной 1 мм от уровня накопленных повреждений.



a



б

Рис. 5. Пределы прочности от уровня накопленных повреждений

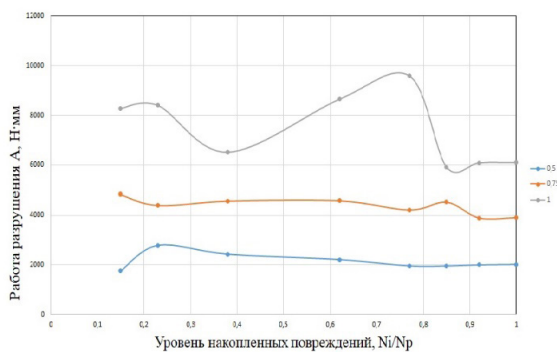
Fig. 5. Limits of strength from the level of accumulated damage

При сравнении зависимости пределов прочности от уровня накопленных повреждений для образцов, испытанных методом SPT и испытаний на растяжение плоских образцов можно отметить, что при уровне $Ni/Np = 0,85$ наблюдается экстремум на графике предела прочности для образцов толщиной 1 мм испытанных двумя методами, которые связаны с накоплением повышенной концентрации дефектов.

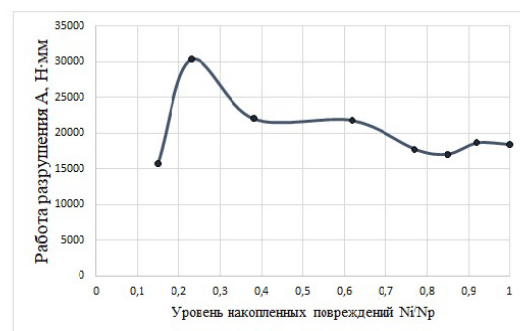
При методе SPT толщинами 0,5, 0,75, 1 мм значения пределов прочности монотонно увеличивается по мере увеличения роста толщины при этом на толщинах 0,5 мм и 0,75 мм не наблюдается экстремум

при $Ni/Np = 0,2$, что может быть связано с недостаточным свободным объемом в образце, далее во всех случаях при $Ni/Np = 0,7-0,8$ наблюдаются аналогичные осцилляции как с предыдущими графиками также связанные с перераспределением и локализацией деформационной энергии, которая приводит к подобному поведению зависимостей.

На рис. 6, *a* показана работа разрушения методом SPT от уровня накопленных повреждений с различными толщинами образцов, на рис. 6, *б* работа разрушения, полученные путем растяжения плоских компактных образцов толщиной 1 мм от уровня накопленных повреждений.



a



б

Рис. 6. Работа разрушения от уровня накопленных повреждений

Fig. 6. The work of destruction on the level of accumulated damage

При сравнении работы разрушения если для плоских образцов есть пик $N_i/N_p = 0,2$, что связано с большим количеством накопленных дефектов и после идет на понижение. Для SPT образцов зависимость не монотонная и максимальная работа разрушения наблюдается при значении накопленных повреждений, соответствующих формированию и началу движения трещины, после чего резко снижается. Для образцов толщиной 0,5 и 0,75 мм на графики никаких изменений практически не наблюдается, что говорит о том, что образцы данной толщины не демонстрируют чувствительности по отношению к общему изменению дефектной структуры материала, поэтому в дальнейшем мы не считаем целесообразным использование для предиктивного анализа оценки уровня накопленных повреждений и не рекомендуется использование таких толщин образцов в качестве тестов SPT.

Выводы

1. Проведен анализ основных причин разрушения РВС в процессе длительной эксплуатации.

2. Осуществлена модернизация оснастки для повышения ее надежности и проведения испытаний SPT образцов с целью определения механических характеристик сталей.

3. Изготовлены круглые образцы для метода SPT и плоские образцы на растяжение из зоны сварного шва уторного узла вертикального резервуара с использованием электроэрозионного станка.

4. Проведены испытания с помощью Small Punch Test, было испытано 48 круглых и 16 классических плоских образцов на растяжение из зоны сварного шва модельного образца уторного узла с различным уровнем накопленных повреждений толщиной 0,5; 0,75; 1 мм из стали 09Г2С.

5. Было зафиксировано страгивание трещины, что приводит к перераспределению и локализации энергии деформации поступающих в материал в процессе циклических воздействий.

6. При сравнении зависимости пределов прочности от уровня накопленных повреждений для образцов, испытанных методом SPT и испытаний на растяжение плоских образцов при уровне $N_i/N_p = 0,85$ наблюдается экстремум на графике предела прочности для образцов толщиной 1 мм, которые связаны с накоплением повышенной концентрации дефектов.

7. Также было установлено, что маленькая толщина образцов не дает достаточного репрезентативного объема и присутствующие в них дефекты могут оказывать влияние на полученные значения. Исходя из полученных данных, разработан метод оценки уровня накопленных повреждений с применением метода Small punch test в сварном шве уторного узла вертикального резервуара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maddox S. J. Status review on fatigue performance of fillet welds // *Journal of Offshore Mech. Arctic Eng.* 2018. V. 130, Iss. 3. Article number 031006. DOI: 10.1115/1.2827941.

2. Schjødt-Thomsen J., Andreasen J. H. Low cycle fatigue behaviour of welded T-joints in high strength steel // *Engineering Failure Analysis*. 2018. V. 93. P. 38–43. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.06.026.

3. Corigliano P., Crupi V., Fricke W., Friedrich N., Guglielmino E. Experimental and numerical analysis of fillet-welded joints under low-cycle fatigue loading by means of full-field techniques // *Journal of Mech. Eng. Sci.* 2015. V. 229 (7). P. 1327–1338. DOI: 10.1177/0954406215571462.

4. Corigliano P., Crupi V., Fricke W., Guglielmino E. Low-cycle fatigue life prediction of fillet-welded joints in ship details // 18th International Conference on Ships and Shipping Research (Lecco, Italy), 2015.

5. Saiprasertkit K., Hanji T., Miki C. Fatigue strength assessment of load-carrying cruciform joints with material mismatching in low- and high-cycle fatigue regions based on the effective notch concept // *International Journal of Fatigue*. 2012. V. 40. P. 120–128. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.12.016.

6. Peek R. Analysis of unanchored liquid storage tanks under lateral loads // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1988. V. 16, Iss. 7. P. 1087–1100. DOI: 10.1002/eqe.4290160710

7. Natsiavas S., Babcock C. D. Behavior of unanchored fluid-filled tanks subjected to ground excitation // *Journal*

of Applied Mechanics. 1988. V. 55, No. 3. P. 654–659. DOI: 10.1115/1.3125844.

8. Wozniak R. S., Mitchell W. W. Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks // Session on Advances in Storage Tank Design, API 43rd Mid-Year Meeting (Toronto, Canada), 1978.

9. Leon G. S., Kausel E. A. M. Seismic analysis of fluid storage tanks // Journal of Structural Engineering ASCE. 1986. V. 112, Iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1986)112:1.

10. Fischer F. D., Rammerstorfer F. G., Schreiner W. The extensible uplifted strip // Acta Mechanica. 1989. V. 80. P. 227–257. DOI: 10.1007/BF01176162.

11. Malhotra P. K., Veletsos A. S. Beam model for base-uplifting analysis of cylindrical tanks // Journal of Structural Engineering ASCE. 1994. V. 120, Iss. 12. P. 3471–3488. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3471).

12. Malhotra P. K., Veletsos A. S. Uplifting analysis of base plates in cylindrical tanks // Journal of Structural

Engineering ASCE. 1994. V. 120, Iss. 12. P. 3489–3505. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3489).

13. Malhotra P. K., Veletsos A. S. Uplifting response of unanchored liquid-storage tanks // Journal of Structural Engineering ASCE. 1994. V. 120, Iss. 12. P. 3525–3547. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3525).

14. Bohra H., Azzuni E., Guzey S. Seismic analysis of open-top storage tanks with flexible foundation // Journal of Pressure Vessel Technology. 2019. V. 141. Article number 041801. DOI: 10.1115/1.4043373.

15. Spritzer J. M., Guzey S. Nonlinear numerical evaluation of large open-top aboveground steel welded liquid storage tanks excited by seismic loads // Thin-Walled Structures. 2017. V. 119. P. 662–676. DOI: 10.1016/j.tws.2017.07.017.

16. Taniguchi T., Yoshida Y., Hatayama K. Applicability of the simplified analysis and relevant calculations to evaluating uplift displacement of unanchored tanks // Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME, (Prague, Czech Republic), 2018. DOI: 10.1115/PVP2018-8423.