

DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-4-383-398

EDN: LLCUFN

Научная статья / Research article

Влияние геометрических дефектов на ресурс цилиндрических резервуаров из алюминиевых сплавов

О.А. Корнев¹, А.Н. Шувалов^{1,2}, А.В. Корнилова^{1,2}, В.А. Ермаков¹¹ Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация² Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ ermakov@mgsu.ru

Поступила в редакцию: 18 мая 2026 г.

Доработана: 19 июля 2026 г.

Принята к публикации: 27 июля 2026 г.

Аннотация. Освоение ресурсов Крайнего Севера должно сопровождаться организацией инфраструктуры для их хранения и транспортировки (резервуары, газгольдеры, трубопроводы). Применение стали для строительства резервуаров в условиях работы при пониженных температурах не всегда целесообразно, ввиду наличия порога хладноломкости и его смещения со временем в сторону положительных температур. В качестве замены авторы предлагают использовать алюминиевые сплавы, которые в условиях работы при пониженных температурах имеют преимущества. Для строительства выбран наиболее экономически выгодный и технологичный метод возведения резервуаров — метод рулонирования, при котором большинство сварных соединений выполняется в заводских условиях с контролем качества. При этом на строительной площадке при выполнении монтажных швов возможно возникновение дефектов, которые снижают ресурс сварных соединений. Выполнено определение количества циклов до зарождения трещины в сварных соединениях стенки резервуара с дефектами в виде угловатостей и линейного смещения полотнищ. Выполнены аналитические расчеты на основе результатов конечно-элементного моделирования работы резервуара и фрагментов стенки резервуара с дефектами. НДС моделей фрагментов стенки приведено к НДС участка стенки резервуара. Расчеты фрагментов с дефектами выполнены с учетом геометрической и физической нелинейности. Предложенный подход позволяет оценивать ресурс соединений, планировать проведение освидетельствований, усиления или ремонтно-восстановительных работ.

Ключевые слова: дефекты стальных резервуаров, угловатость монтажных швов, смещение листов, сварной шов, аргонодуговая сварка

Вклад авторов: Корнев О.А. — общее руководство и проведение экспериментальных исследований; Шувалов А.Н. — разработка идеологии исследования; Корнилова А.В. — обработка данных расчетного эксперимента, написание текста статьи; Ермаков В.А. — создание графического материала, написание текста статьи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Корнев Олег Александрович, заместитель директора, Научно-исследовательский институт экспериментальной механики, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4890-2128; ORCID: 0009-0009-5545-5284; e-mail: KornevOA@mgsu.ru

Шувалов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры испытания сооружений, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 8488-4644; ORCID: 0009-0007-0289-7412; e-mail: AShuvalov@mgsu.ru

Корнилова Анна Владимировна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт экспериментальной механики, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; профессор кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240; ORCID: 0000-0001-5569-9320; e-mail: KornilovaAV@mgsu.ru

Ермаков Валентин Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт экспериментальной механики, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3227-6815; ORCID: 0000-0002-8862-8139; e-mail: Ermakov@mgsu.ru

© Корнев О.А., Шувалов А.Н., Корнилова А.В., Ермаков В.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в публикуемую статью.

Для цитирования: Корнев О.А., Шувалов А.Н., Корнилова А.В., Ермаков В.А. Влияние геометрических дефектов на ресурс цилиндрических резервуаров из алюминиевых сплавов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2026. Т. 22. № 4. С. 383–398. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-383-398> EDN: LLCUFN

Effect of Geometric Defects on the Service Life of Cylindrical Tanks Made of Aluminium Alloys

Oleg A. Kornev¹, Aleksandr N. Shuvalov¹, Anna V. Kornilova^{1,2}, Valentin A. Ermakov¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ ermakov@mgsu.ru

Received: May 18, 2026

Revised: July 19th, 2026

Accepted: July 27, 2026

Abstract. The development of resources in the Far North must be accompanied by the establishment of infrastructure for their storage and transport (tanks, gas holders, pipelines). The use of steel for the construction of tanks in low-temperature operating conditions is not always advisable, due to the presence of a cold-shortness threshold and its shift over time towards positive temperatures. As an alternative, the authors propose the use of aluminium alloys, which offer advantages in low-temperature operating conditions. The most cost-effective and technologically advanced method of tank construction has been selected — the coil-forming method, in which the majority of welded joints are pre-fabricated under quality control. However, defects may arise at the construction site during the execution of field welds, which reduce the service life of the welded joints. The number of cycles required for crack initiation in welded joints of a tank wall with defects in the form of angular and linear misalignment of the plate sections has been determined. Analytical calculations were performed based on the results of finite element modelling of the tank and of tank wall fragments with defects. The stress state of the wall fragment models was reduced to the stress state of a tank wall region. Calculations for fragments with defects were performed taking into account geometric and physical non-linearity. The proposed approach enables the service life of joints to be assessed and facilitates the planning of inspections, strengthening, or repair and restoration work.

Keywords: defects in steel tanks, angularity of mounting seams, sheet misalignment, weld, argon arc welding

Authors' contribution: Kornev O.A. — supervision, investigation; Shuvalov A.N. — methodology; Kornilova A.V. — data processing, text writing; Ermakov V.A. — visualization, text writing. All the authors have read the final version of the article and approved it.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the article being published.

For citation: Kornev OA, Shuvalov AN, Kornilova AV, Ermakov VA. Effect of geometric defects on the service life of cylindrical tanks made of aluminium alloys. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(4):383–398. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-383-398> EDN: LLCUFN

Oleg A. Kornev, Deputy Director, Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4890-2128; ORCID: 0009-0009-5545-5284; e-mail: KornevOA@mgsu.ru

Aleksandr N. Shuvalov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8488-4644; ORCID: 0009-0007-0289-7412; e-mail: AShuvalov@mgsu.ru

Anna V. Kornilova, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Professor of the Department of Construction Technologies and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240; ORCID: 0000-0001-5569-9320; e-mail: KornilovaAV@mgsu.ru

Valentin A. Ermakov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3227-6815; ORCID: 0000-0002-8862-8139; e-mail: Ermakov@mgsu.ru

1. Введение

Согласно данным геологической разведки, в Арктике содержится 30 % мировых запасов природного газа, 13 % нефти, 9 % угля, большие запасы металлов, в том числе редкоземельных, и минералов (бриллианты, графит). Одной из амбициозных задач по освоению природных ресурсов является реализация проекта «Арктик СПГ-2» для поставок сжиженного природного газа (СПГ) в Китай [1]. Районы Крайнего Севера России также богаты природными ресурсами. Например, на территории Республики Саха (Якутия) сосредоточено 23 месторождения нефти (453 млрд м³) и 44 месторождения газа (1392 млрд м³), среди которых одно обладает статусом уникального и 9 — крупных [2]. Освоение таких объемов ресурсов невозможно без создания качественной инфраструктуры — трубопроводов, газгольдеров, резервуаров для перекачки и хранения продуктов.

Однако строительству новых объектов и их дальнейшей эксплуатации сопутствуют технические риски, среди которых выделяют строительно-монтажные и эксплуатационные. Труднодоступность регионов, сложные геологические условия и пониженные температуры требуют реализации наукоемких и высокотехнологичных проектов [3]. Применение стали для строительства резервуаров в условиях работы при пониженных температурах не всегда целесообразно ввиду наличия порога хладноломкости и его смещения со временем в сторону положительных температур [4]. В исследовании [5] определено, что за 31 год эксплуатации трубопровода порог хладноломкости стали 17Г1С сместился на 10 градусов: с –40 до –30 °С. Кроме того, при длительной эксплуатации снижаются физико-механические характеристики стали. Например, предел прочности стали Р92 уменьшился за 10 лет с 745 до 650 МПа [6].

В качестве замены стальных сплавов целесообразно рассмотреть сплавы алюминиевые, которые не обладают порогом хладноломкости. Физико-механические характеристики современных алюминиевых сплавов не уступают некоторым сталям, а при понижении температуры только улучшаются. Меньший объемный вес (в 3 раза) и повышенная коррозионная стойкость позволят уменьшить затраты на транспортировку, монтаж и эксплуатацию алюминиевых конструкций [7].

С точки зрения технологии возведения для климатических условий Крайнего Севера наиболее перспективным является метод рулонирования как наиболее экономически выгодный и технологичный [8], что также подтверждается расчетом металлоемкости при рассмотрении резервуаров разных объемов [9]. Основная часть сварочных работ с проведением дефектоскопии осуществляется на заводе — свариваются полотнища стенок. Готовые полотнища сворачиваются в рулон и доставляются на строительную площадку, где устанавливаются вертикально и постепенно разворачиваются. Таким образом, на строительной площадке выполняется относительно небольшой объем сварочных работ (вертикальный замыкающий шов, приварка патрубка и др.).

Тем не менее даже при такой технологии существует вероятность возникновения дефектов. В качестве основных можно выделить дефекты в зоне стыка полотнищ стенок: угловатость и линейное смещение полотнищ относительно друг друга [10].

Нормативные документы регламентируют допускаемые параметры данных дефектов при изготовлении конструкции, а также при оценке их расчетного срока службы. Например, при изготовлении полотнищ стенок из стали класса С245 допускается угловатость (угловые деформации стыков) равная 20 мм на базе измерения 500 мм. Также допускается линейное смещение поверхностей относительно друг друга при толщине деталей более 10 мм — 10 % толщины, но не более 3 мм.

Расчетный срок службы резервуаров определяется угловатостью вертикальных сварных швов стенки в случае отсутствия трещиноподобных эксплуатационных дефектов. Предельное значение угловатости зависит от цикличности нагружения конструкций, толщины стенок. Например, при годовом числе циклов нагружения, равном 250 и толщине стенки более 15 мм, — предельное значение угловатости составляет 5 мм на базе измерения 500 мм. Выполнение этого условия обеспечит срок службы 40 лет. При увеличении цикличности нагружения предельное значение должно определяться расчетным путем.

Если резервуар смонтирован с превышением предельных параметров дефектов допускается его приемка на основе выполненных расчетов несущей способности. Согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 31385-2023¹ расчет должен проводиться с помощью метода конечных элементов, учитывать фактическую геометрию конструкции, выполнять проверки по прочности (в том числе малоцикловой) и устойчивости.

Отечественных нормативных документов, которые бы однозначно регламентировали правила проектирования резервуаров из алюминиевых сплавов, на сегодняшний день не существует. Для проектирования конструкций зданий и сооружений из алюминиевых сплавов разработан свод правил 128.13330.2016², однако в документе сказано, что его положения не распространяются на алюминиевые конструкции, подвергающиеся многократному воздействию нагрузок.

В связи с этим для строительства резервуаров из алюминиевых сплавов требуется разработка и согласование дополнительной документации, подтверждающей безопасность принятых решений. До 1 сентября 2024 г. в качестве такого документа выступали специальные технические условия (СТУ), в настоящее время необходима разработка РПСО (результаты применения способов обоснования).

Проектирование осложняется необходимостью учета цикличности нагружения и сваркой алюминиевых конструкций, возможным наличием дефектов монтажа. Для обоснования решений и обеспечения безаварийной эксплуатации при минимальных затратах ресурсов необходимо проведение научных исследований в данном направлении.

Исследования направлены на изучение изменения свойств основного материала и его сварных соединений при рулонировании, подборе оптимальных диаметров каркасов рулонов, усталостной прочности материалов после рулонирования и разворачивания. В [11] исследовался уровень напряжений при скручивании листов разной толщины в рулон из стали 09Г2С. Определено, что при скручивании листа толщиной 18 мм на каркас диаметром 2,2 м возникают напряжения, превышающие предел текучести материала на 37,6 МПа, что приводит к значительным пластическим деформациям. Подобные работы ведутся не только экспериментально, но и расчетным путем методом конечных элементов [12]. Исследование остаточных напряжений в сварных швах стенок резервуаров также показало наличие упругопластических деформаций [13].

Исследование стальных сварных соединений листов с имитацией технологии рулонирования [14] показало, что примененные технологии способствуют хрупкому разрушению. При этом критические температуры вязкохрупкого перехода смещаются в положительную сторону.

Резервуары могут быть нагружены статически, однако в ряде случаев их несущие конструкции работают в условиях циклического нагружения, что требует оценки ресурса до разрушения. Данной тематике посвящено исследование [15], в котором экспериментально и теоретически оценивалось влияние процесса рулонирования на количество циклов до разрушения образцов. Испытания показали, что при одной и той же нагрузке количество циклов до разрушения после рулонирования в среднем увеличилось в 3,4 раза.

Дефекты стальных резервуаров (отклонение образующих от вертикали, угловатость монтажных швов и др.) устраняются методом вставок, свальцованных под проектный радиус. При этом важно знать остаточное напряженное состояние стенок резервуара и правильно подбирать радиус вальцовки [16]. При неправильном ремонте методом вставок возможно возникновение «хлопунов». Для решения данной проблемы авторами [17] разработана методика компьютерного моделирования, позволяющая прогнозировать появление данных дефектов.

Литературный поиск по данным тематикам применительно к резервуарам из алюминиевых сплавов показал ограниченное количество современных трудов. Основная часть исследований приходится

¹ ГОСТ 31385 – 2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Москва : Государственный институт стандартизации; 2023. 112 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/80/80549.htm> (дата обращения: 18.02.2026).

² СП 128.13330 «СНиП 2.03.06-85 Алюминиевые конструкции». Москва, 2016. 86 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293747/4293747699.pdf> (дата обращения: 27.02.2026).

на 1970–1980-е гг. Среди них исследование Х.Р. Саидова по оценке влияния поверхностных дефектов на усталостную прочность элементов листовых конструкций, в том числе резервуаров, из алюминиевых сплавов [18]. В работе определено, что предварительное пластическое деформирование, вызванное процессом рулонирования, приводит к увеличению сопротивления материала усталостному разрушению на стадии роста трещины в 2–3 раза в зависимости от уровня нагружения.

Таким образом, развитие регионов Крайнего Севера и технологий строительства делает использование современных алюминиевых сплавов для строительства резервуаров методом рулонирования актуальным.

Цель исследования – оценка влияния потенциальных дефектов монтажа резервуара из алюминиевого сплава с учетом физико-механических характеристик сварного соединения и возможной перегрузки при приемочных испытаниях.

2. Материалы, исходные данные и методика исследования

В качестве рабочего материала в исследовании принят ранее выбранный авторами алюминиевый деформируемый сплав 1915 в состоянии Т группы сплавов Al — Zn — Mg [7]. Основные физико-механические характеристики сплава и его сварного соединения, необходимые для моделирования, получены экспериментально и представлены в табл. 1. Испытания образцов проведены по Межгосударственным стандартам ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 25.502-79³.

Таблица 1. Физико-механические характеристики алюминиевого сплава 1915Т при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Table 1. Physical and mechanical properties of 1915T aluminium alloy at $t = 20^{\circ}\text{C}$

Характеристика / Characteristics	Основной металл / Base metal	Зона термического влияния / Heat-affected zone	Сварной шов / Weld
Предел прочности, σ_B , МПа / Ultimate strength, σ_B , МПа	365	270	269
Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа / Yield strength, $\sigma_{0,2}$, МПа	255	210	164
Предел выносливости при симметричном цикле, σ_{-1} , МПа / Fatigue strength for a symmetrical cycle, σ_{-1} МПа	100	—	77
Модуль упругости, E , МПа / Young's modulus, E , МПа	70 000	70 000	70 000
Относительное сужение, ψ , % / Reduction, ψ , %	28	—	26,2

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым / S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

В качестве объекта исследования принят резервуар из алюминиевого сплава по типовому проекту. Диаметр резервуара составляет 15,18 м, а высота — 11,92 м. Днище резервуара образовано листом толщиной 6 мм. Резервуар имеет входной патрубок толщиной 6 мм и диаметром 530 мм. Вокруг патрубка приварено усиление стенки толщиной 6 мм. На отметке +7,700 м предусмотрено кольцо жесткости из алюминиевого профиля. На отметке +11,600 расположено опорное кольцо жесткости, на которое опираются конструкции покрытия. Покрытие резервуара состоит из центрального

³ ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва : Стандартинформ, 2008. 26 с.; ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных; Температурах. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. 12 с.; ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Москва : Государственный стандарт Союза ССР, 1985. 25 с.

распорного кольца в виде трубы толщиной 20 мм диаметром 510 мм и системы радиальных и тангенциальных прогонов из алюминиевых профилей. Поверх радиальных прогонов приварен настил толщиной 6 мм.

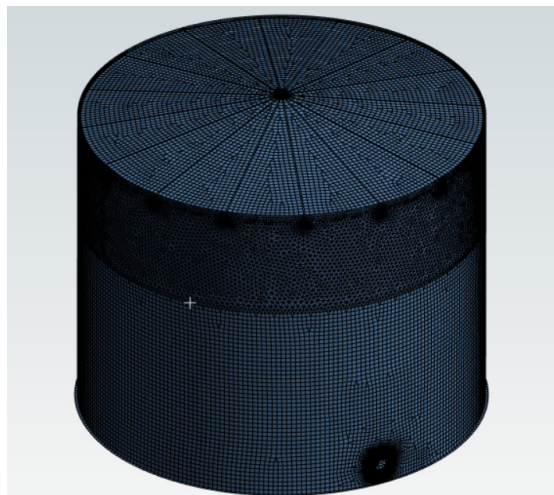


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели
Источник: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 1. General view of the finite element model
Source: made by V.A. Ermakov.

Толщина стенки меняется по высоте:

- от отметки 0,000 до +3,000 — 10 мм;
- от отметки +3,000 до +6,000 — 8 мм;
- свыше отметки +6,000 — 6 мм.

Расчетная модель резервуара создана в ПК Ansys с помощью стержневых и пластинчатых элементов (рис. 1).

В данном исследовании модель закреплена на жестком основании. Модель рассчитана в упругой постановке, для задания материала использован модуль упругости $E = 70000$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ и плотность алюминиевых сплавов $\rho = 2700$ кг/м³.

Для расчета приняты следующие климатические условия:

- ветровой район Ia;
- снеговой район IV.

В качестве рабочей жидкости принята нефть с плотностью $\rho_{\text{ж}} = 0,9$ т/м³.

К модели были приложены следующие основные нагрузки:

- давление рабочей жидкости;
- снеговая нагрузка на покрытие резервуара;
- ветровая нагрузка.

Анализ результатов расчета показал, что НДС стенки формируется в основном за счет действия давления рабочей жидкости. Так как исследование направлено на изучение НДС стенки с дефектами, было принято решение дальнейшие расчеты выполнять на данное воздействие.

Моделирование резервуаров целиком с дефектами трудоемко и требует больших расчетных мощностей, поэтому оценка влияния дефектов осуществлялась на отдельных объемных моделях фрагментов стенок. При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) моделей фрагментов повторяет НДС основной модели резервуара.

Для исследования выбрано два типа дефектов монтажа резервуаров методом рулонирования при стыковке полотнищ стенки: угловатость и линейное смещение полотнищ.

В результате была разработана базовая модель фрагмента без дефектов, 7 моделей стенки с угловатостями (рис. 2) и 5 моделей со смещением полотнищ (рис. 3). Все модели учитывают наличие одностороннего сварного шва, полученного методом аргонодуговой сварки. На схеме указана зона сварного шва (СШ), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Граница сварного шва специально немного расширена, чтобы зона концентрации напряжений приходилась на один тип материала. Высота моделей составляет 100 мм.

Вертикальным граням моделей назначалось симметричное закрепление. К горизонтальным граням моделей прикладывались перемещения и поперечное распределенное усилие, соответствующие горизонтальному перемещению узлов стенки резервуара и поперечным усилиям в месте «вырезания» фрагмента модели от действия давления рабочей жидкости.

Вертикальным граням моделей назначалось симметричное закрепление. К горизонтальным граням моделей прикладывались перемещения и поперечное распределенное усилие, соответствующие горизонтальному перемещению узлов стенки резервуара и поперечным усилиям в месте «вырезания» фрагмента модели от действия давления рабочей жидкости.

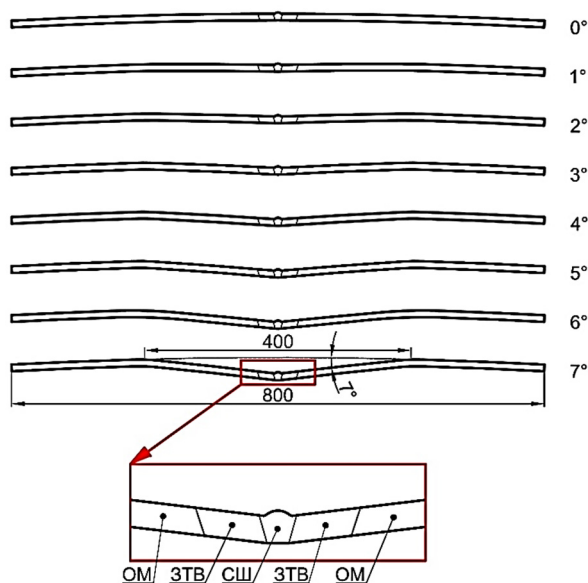


Рис. 2. Схемы фрагментов стенок с дефектами в виде угловатостей

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 2. Schematics of wall sections with defects in the form of angular misalignment

S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

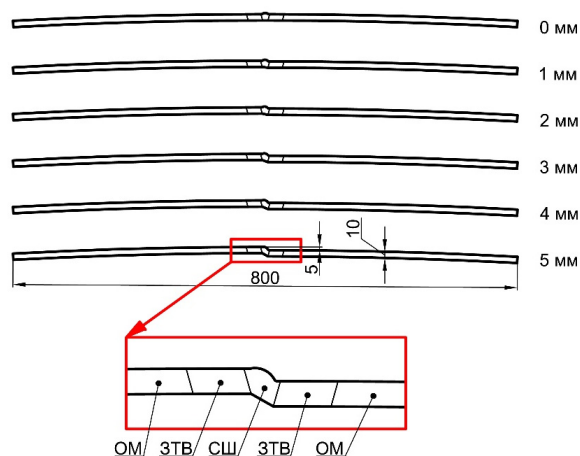


Рис. 3. Схемы фрагментов стенок с дефектами в виде линейного смещения полотнищ

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 3. Schematics of wall sections with defects in the form of linear misalignment of the wall panels

S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

Расчет выполнялся с учетом геометрической и физической нелинейности. Для реализации физической нелинейности работы материалов в расчетной программе были заданы билинейные диаграммы деформирования.

Для верификации расчетной модели фрагмента с дефектом сравнивались напряжения в зоне, расположенной вдали от дефекта с напряжениями в модели резервуара.

Для имитации перегрузки при испытаниях и цикла нормальной загрузки к плоскости стенки изнутри прикладывалось давление рабочей жидкости в следующей последовательности:

1. 125 % среднего рабочего давления в уровне рассматриваемого фрагмента, имитирующего перегрузку при приемочных испытаниях резервуара.

2. Нулевая нагрузка, соответствующая полной разгрузке резервуара.

3. 100 % среднего рабочего давления в уровне рассматриваемого фрагмента, имитирующего цикл нормальной эксплуатации резервуара.

В результате расчета каждой модели с дефектом определялся самый нагруженный узел, для которого строилась диаграмма «Напряжения — деформация».

Общий вид диаграммы «Напряжения — деформация» представлен на рис. 4. При нагружении резервуара без перегрузки возникает рабочий цикл, соответствующий участку «0–0'». Однако из-за перегрузки в ходе испытаний, а также наличия концентрации напряжений возможно возникновение пластических деформаций, которые при дальнейшем циклическом нагружении изменяют параметры цикла, что, в свою очередь, изменяет предел выносливости сварного соединения.

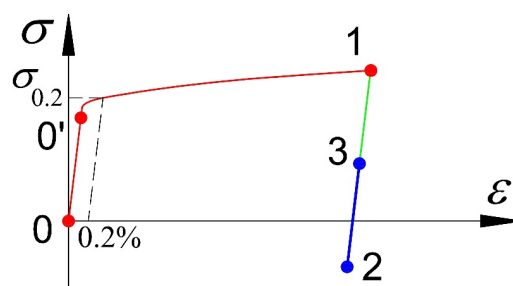


Рис. 4. Схема деформирования самого нагруженного узла в разных условиях нагружения

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 4. Deformation diagram of the most heavily loaded node under various loading conditions

S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

На участке «0–1» происходит нарастание напряжений и деформаций вследствие приложения испытательной нагрузки (125 % от эксплуатационной), так как напряжения превышают значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, начинаются пластические деформации. На следующем этапе нагрузка полностью снимается (участок «1–2»). Нагружение 100 % эксплуатационной нагрузки приводит к линейному увеличению деформаций и напряжений (участок «2–3»). В дальнейшем повторяется разгрузка и нагружение той же нагрузкой. Таким образом, напряжения в точке «2» соответствуют минимальным напряжениям цикла $\sigma_{\min}$, а напряжения в точке «3» — максимальным напряжениям цикла $\sigma_{\max}$.

Для оценки допускаемого числа циклов до разрушения нормативными документами закреплено две методики:

1. Методика по ГОСТ 34233.6-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках.

2. Методика по ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

Методика по ГОСТ основана на использовании амплитуды напряжений σ_a , коэффициентах запаса прочности по числу циклов n_N и по напряжениям n_σ , характеристиках A и B , приводимых для определенных стальных и алюминиевых сплавов, а также коэффициента C_t для учета изменения температуры эксплуатации:

$$[N] = \frac{1}{n_N} \left[\frac{AC_t}{\sigma_a - \frac{B}{n_\sigma}} \right]^2.$$

Методика ПНАЭ более расширена и дополнительно учитывает характеристики материала, в том числе прочность и пластичность, коэффициент асимметрии цикла напряжений. Однако в документе заявлено, что формула применяется для сталей при отношении $\sigma_{0,2} / \sigma_B \leq 0,7$ и количестве циклов до 10^6 .

В документе изначально приведена формула определения допускаемой амплитуды напряжений:

$$[\sigma_a] = \frac{E e_c}{(4n_N [N_0])^m} + \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \frac{1+r}{1-r}},$$

где E — модуль упругости материала; σ_{-1} — предел выносливости материала при симметричном цикле; n_N — коэффициент запаса по количеству циклов (в рамках научного исследования принимается равным 1); $m = 0,5$ — характеристика материала, принимаемая по таблице 5.7 ПНАЭ Г-7-002-86; σ_B — предел прочности материала; $[N_0]$ — допускаемое число циклов до разрушения; r — коэффициент асимметрии цикла нагружения; e_c — характеристика пластичности, определяемая по формуле

$$e_c = \ln \left(\frac{100}{100 - \psi} \right).$$

Преобразование выражения и подстановка характеристики пластичности позволяет выделить формулу для расчета допускаемого числа циклов до разрушения:

$$[N_0] = \frac{1}{4} \left(\frac{Ee_c}{\left[\sigma_a \right] - \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \frac{1+r}{1-r}}} \right)^2.$$

Также для повышения числа циклов могут применяться различные методы поверхностного упрочнения и увеличения предела выносливости соединений.

Например, для существенного повышения усталостной прочности успешно применяется ультразвуковая ударная обработка, что доказано при испытании образцов сварных соединений из алюминиевого сплава 2024-T4 [19]. Данный метод давно известен, прост и широко применяется. Однако разрабатываются и более сложные методы. В исследовании [20] показано, что комплексная обработка, сочетающая термическую обработку в растворе, частичную прокатку и естественное старение, позволяет увеличить ресурс сварных соединений в 2–6 раз.

В рамках данного исследования было принято решение применительно к алюминиевому сплаву 1915T использовать методику по ПНАЭ Г-7-002-86 ввиду возможности учета асимметрии цикла нагружения, возникающей при перегрузке конструкции и пластической деформации в зоне концентрации.

Ограничением исследования являются характеристики дефектов: 7 градусов угловатости и 5 мм линейного смещения полотнищ. В расчетах не учтены возможные пластические деформации при рулонировании и разворачивании листов, что также является ограничением исследования. Результаты исследования применимы для любого участка вертикального стыкового шва стенки, за исключением зоны уторного узла.

3. Результаты и обсуждение

В результате расчета на основную нагрузку (давление рабочей жидкости) получены изополя эквивалентных напряжений (рис. 5) и радиальные перемещения элементов резервуара (рис. 6).

Максимальные напряжения в стенке вдали от зон концентрации составляют 78,48 МПа и расположены на высоте 750 мм от днища резервуара. Для верификации модели фрагмента резервуара приняты средние значения нагрузки, перемещений и поперечного распределенного усилия на данной высоте, равные 99 кПа, 8,52 мм и 1,4 Н/мм соответственно.

В результате расчета модели фрагмента стенки резервуара без дефектов на удалении от сварного шва получены эквивалентные напряжения, равные 78,46 МПа (рис. 7).

Таким образом, принятый подход позволяет получить в модели фрагмента НДС, аналогичное с тем состоянием, что возникает в том же месте при расчете всего резервуара. При этом наблюдается достаточная сходимость в пределах 5 %.

Так как диаграмма деформирования материала получена по результатам одноосных испытаний на растяжение, дальнейшая оценка результатов осуществлялась не по эквивалентным напряжениям, а по кольцевым.

В результате серии расчетов фрагментов с угловатостями и смещениями были получены изополя кольцевых напряжений (рис. 8) и графики «Напряжения — деформация» наиболее нагруженных узлов моделей в зонах у сварных швов (рис. 9).

Аналогично графикам на рис. 9 получены графики без перегрузки.

В результате обработки диаграмм получены параметры циклов нагружения для различных типов дефектов, с перегрузкой и без (табл. 2).

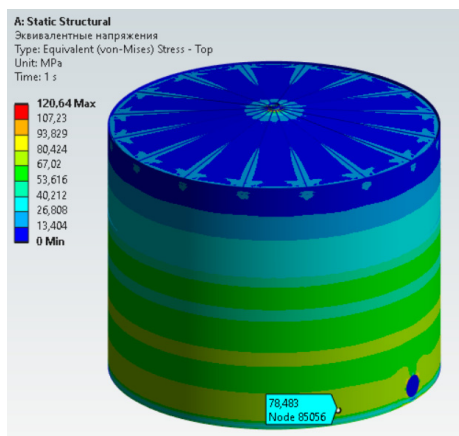


Рис. 5. Изополя эквивалентных напряжений, МПа
(зона патрубка условно не показана)
И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 5. Equivalent stresses, MPa
(the pipe connection area is not shown for clarity)
S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

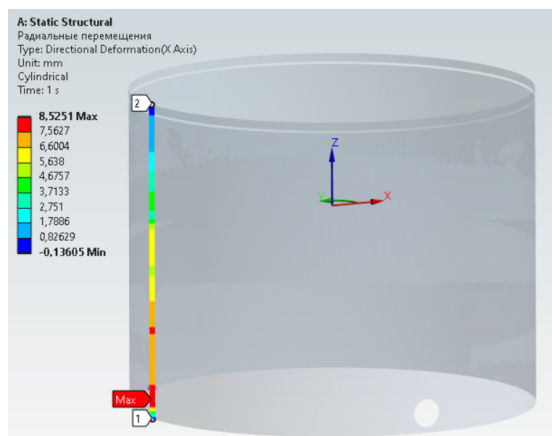


Рис. 6. Радиальные перемещения элементов резервуара, мм
И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 6. Radial displacement of tank elements, mm
S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

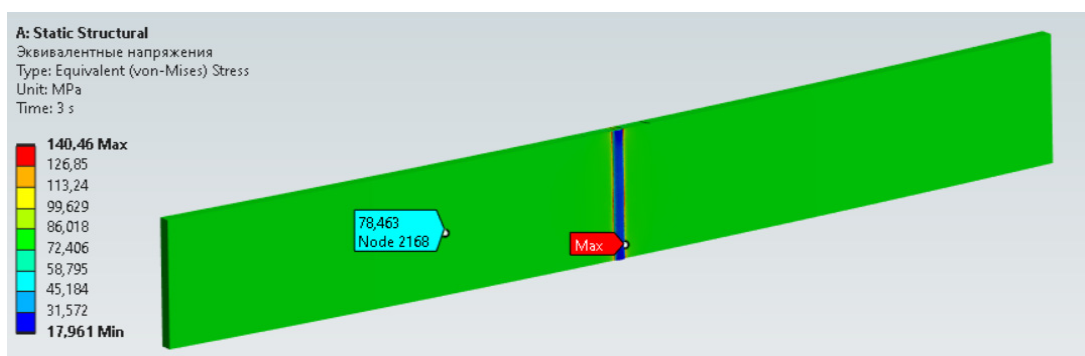


Рис. 7. Эквивалентные напряжения в модели фрагмента стенки резервуара, МПа
И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 7. Equivalent stresses in the tank wall fragment model, MPa
S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

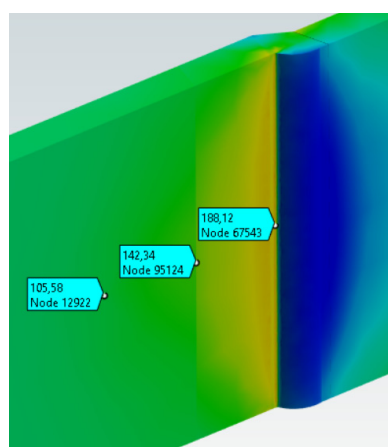
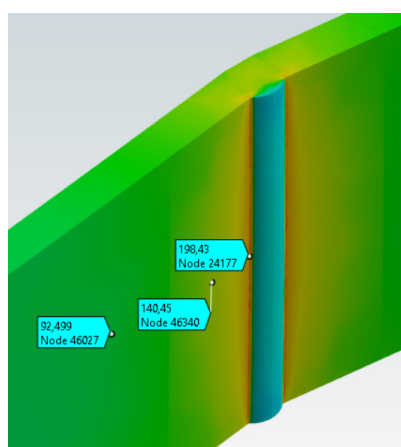


Рис. 8. Изополя кольцевых напряжений в зонах у сварного шва на этапе нагружения с перегрузкой:
a — в модели с угловатостью 7°; *б* — в модели со смещением 5 мм
И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 8. Hoop tension in the regions adjacent to the weld during the overload loading stage:
a — in the model with a 7° angular misalignment; *б* — in the model with a 5 mm linear misalignment
S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

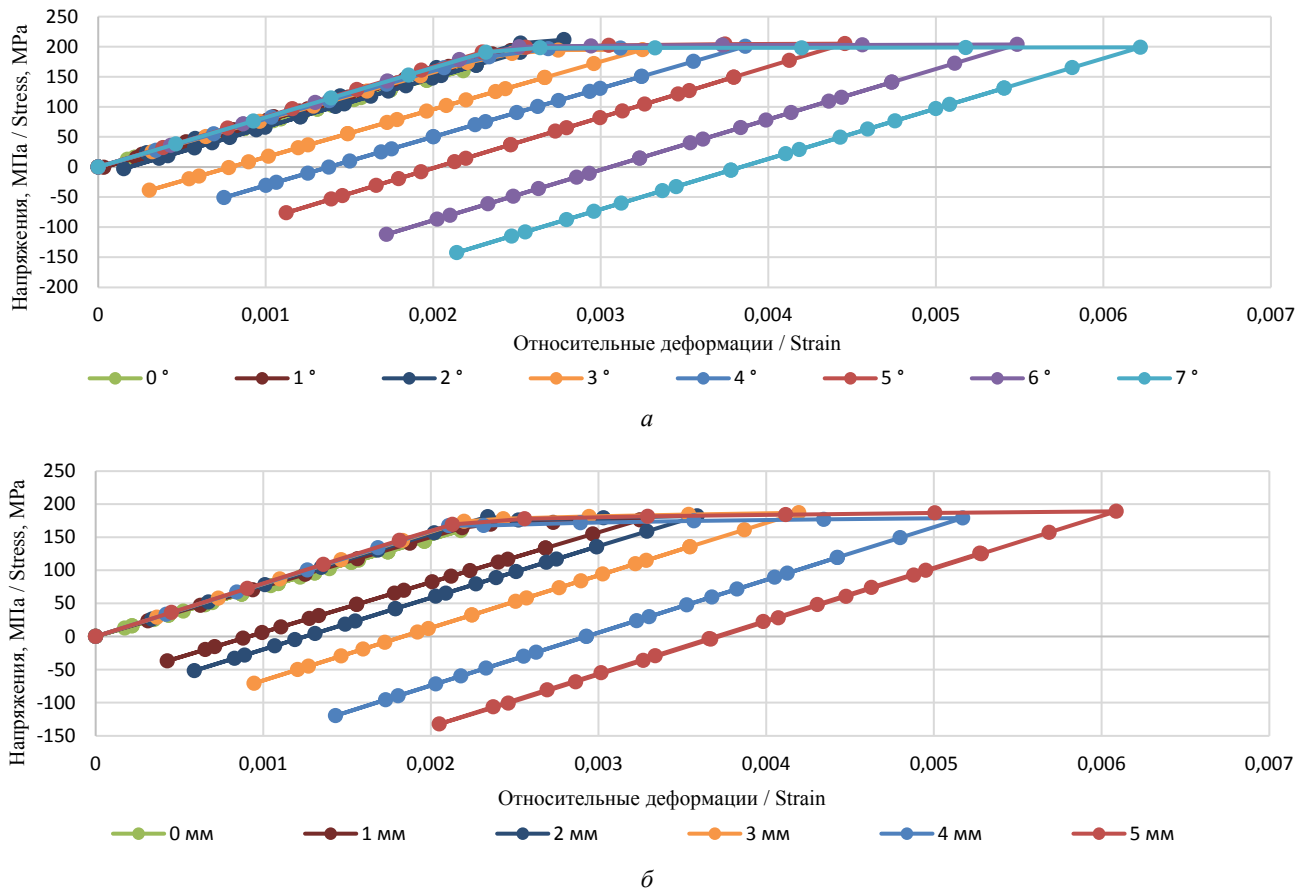


Рис. 9. Графики «Напряжения – деформация» с учетом перегрузки в наиболее нагруженных узлах:

а — в моделях с угловатостями; б — в моделях со смещениями

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 9. Stress–strain diagrams accounting for overload at the most heavily loaded joints:

а — in models with angular misalignment; б — in models with linear misalignment

S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

Таблица 2. Параметры циклов / Table 2. Cycle parameters

Тип дефекта / Type of defect	С перегрузкой / Overload			Без перегрузки / Normal load		
	$\sigma_{\min}$, МПа / MPa	$\sigma_{\max}$, МПа / MPa	r	$\sigma_{\min}$, МПа / MPa	$\sigma_{\max}$, МПа / MPa	r
Без дефектов / Defectless	0,0	127,9	0,00	0,0	127,9	0,00
Угловатость 1° / Angular misalignment 1°	–0,6	154,8	0,00	0,0	167,0	0,00
Угловатость 2° / Angular misalignment 2°	–2,9	169,0	–0,02	0,0	188,5	0,00
Угловатость 3° / Angular misalignment 3°	–38,7	148,6	–0,26	–7,6	188,4	–0,04
Угловатость 4° / Angular misalignment 4°	–50,8	150,5	–0,34	–14,7	195,8	–0,08
Угловатость 5° / Angular misalignment 5°	–76,0	149,2	–0,51	–23,2	201,7	–0,11
Угловатость 6° / Angular misalignment 6°	–112,2	140,9	–0,80	–50,5	202,4	–0,25
Угловатость 7° / Angular misalignment 7°	–142,3	131,1	–1,09	–75,4	197,8	–0,38
Смещение 1 мм / Linear misalignment 1 mm	–36,81	133,54	–0,28	–4,14	169,62	–0,02
Смещение 2 мм / Linear misalignment 2 mm	–51,68	135,53	–0,38	–11,59	175,44	–0,07
Смещение 3 мм / Linear misalignment 3 mm	–70,70	135,52	–0,52	–25,32	180,88	–0,14
Смещение 4 мм / Linear misalignment 4 mm	–119,52	119,39	–1,00	–64,49	174,55	–0,37
Смещение 5 мм / Linear misalignment 5 mm	–132,18	125,77	–1,05	–74,10	184,14	–0,40

И с т о ч н и к: выполнено В.А. Ермаковым / S o u r c e: made by V.A. Ermakov.

На основании данных о параметрах циклов нагружения и физико-механических характеристиках материала получено количество циклов до зарождения трещины для каждого из вариантов модели. Сводные графики ресурса представлены на рис. 10.

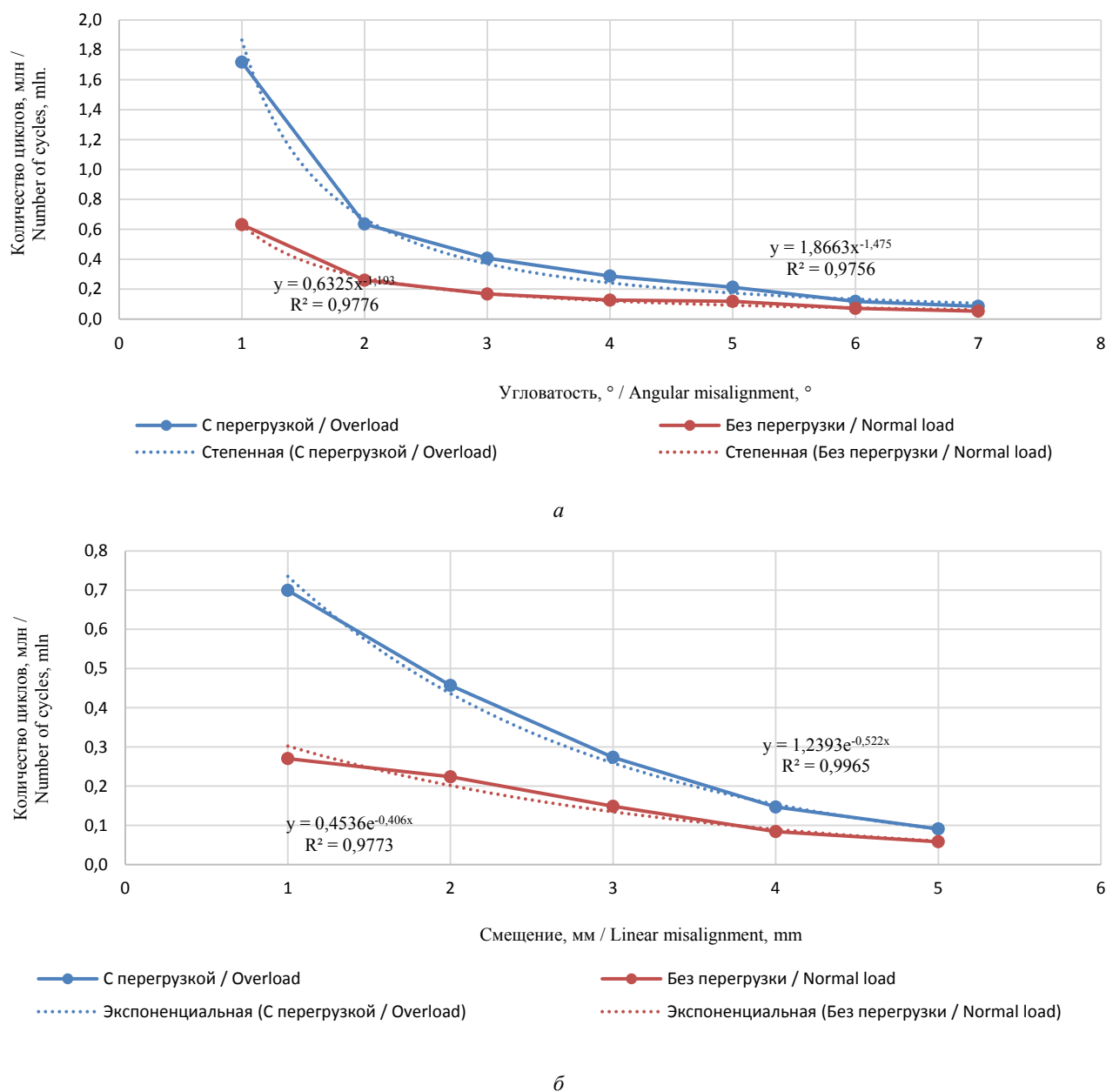


Рис. 10. Ресурс стыкового сварного соединения:
 а — при наличии угловатости; б — при наличии линейного смещения полотнищ
 Источник: выполнено О.А. Корневым.

Figure 10. Fatigue strength of a butt weld:
 а — where there is angular misalignment; б — where there is a linear misalignment of the plate edges
 Source: made by O.A. Kornev.

Анализ графиков на рис. 10 показал, что наличие и степень дефекта ожидаемо отрицательно сказываются на количестве циклов до зарождения трещины. При этом положительное влияние на работу сварного соединения оказывает перегрузка во время приемочных испытаний. Влияние нивелируется по мере увеличения степени дефектности.

Результаты проведенных расчетов по оценке влияния угловатости описываются степенной функцией в интервале от 1 до 7°, а данные по оценке линейного смещения – экспоненциальной зависимостью в интервале от 1 до 5 мм. При этом минимальная величина достоверности аппроксимации составляет 0,956.

Дополнительно был проведен анализ количества циклов до зарождения трещины в зависимости от амплитуды деформаций цикла нагружения ε_a и типа дефекта. Полученные массивы данных нанесены на общую шкалу (рис. 11).

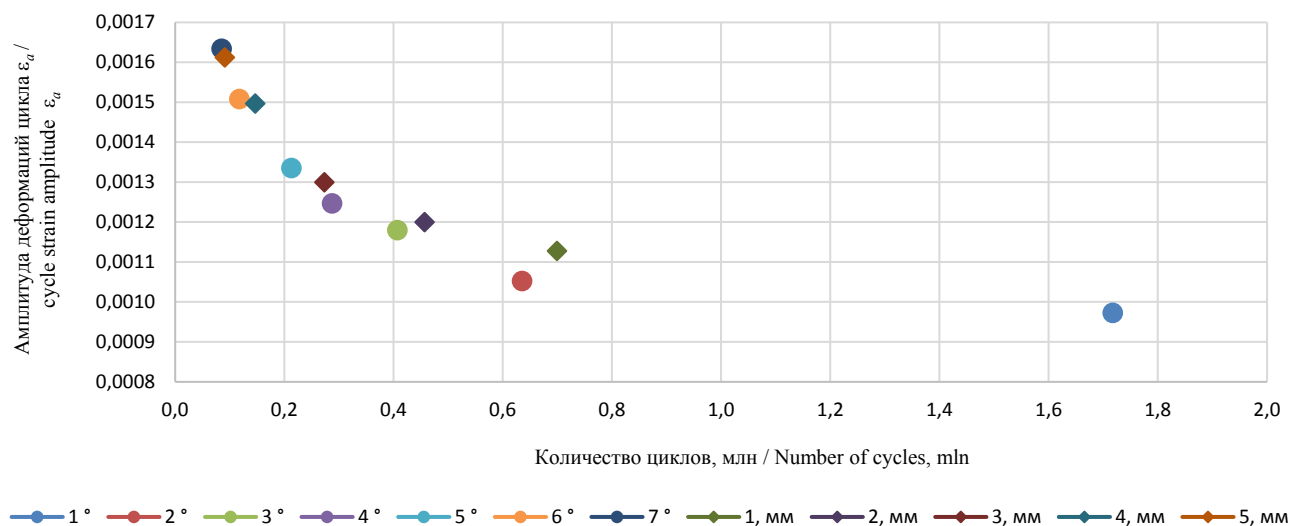


Рис. 11. Зависимость количества циклов до зарождения трещин от амплитуды деформаций ε_a при разных типах дефектов
И с т о ч н и к: выполнено О.А. Корневым.

Figure 11. The number of cycles before cracks initiate as a function of the strain amplitude ε_a for different types of defects
S o u r c e: made by O.A. Kornev.

Анализ данных (рис. 11) показывает аналогичный характер деформирования фрагментов стенки с угловатостями и линейным смещением полотнищ. В интервале от 0,6 до 0,7 млн циклов отчетливо видно, что угловатость 2° является более опасным дефектом, чем линейное смещение полотнищ, равное 1 мм, потому что примерно такое же количество циклов достигается при меньшей амплитуде деформаций.

4. Заключение

Анализ исследований в области строительства резервуаров методом рулонирования позволяет сделать следующие выводы:

1. В большинстве публикаций конструкционным материалом является сталь, и лишь ограниченная часть трудов СССР 1970–1980-х гг. относится к алюминиевым сплавам.
2. Экспериментальные исследования сосредоточены на учете влияния технологии рулонирования и сварных соединений на усталостную прочность конструкций.
3. Средства компьютерного моделирования направлены на прогнозирование появления дефектов в результате ремонтно-восстановительных работ методом вставок.

Новизна исследования заключается в расчете количества циклов до разрушения сварных соединений стенок резервуара из алюминиевого сплава с геометрическими дефектами на основе результатов компьютерного моделирования.

Исходными данными для проведения расчетов послужил типовый проект резервуара, а также результаты определения физико-механических характеристик алюминиевого сплава 1915Т.

В общей сложности было подготовлено 14 конечно-элементных моделей: модель резервуара из стержней и пластин; модель фрагмента стенки со сварным швом без дефектов; 7 моделей фрагментов стенки со сварным швом и разной степенью угловатости; 5 моделей фрагментов стенки со сварным швом и разной степенью линейного смещения полотнищ. Фрагменты стенок рассчитывались с учетом и без учета перегрузки.

Анализ результатов показал закономерное снижение ресурса сварного соединения с увеличением степени дефектности. При этом отмечается положительное влияние перегрузки конструкций при приемо-сдаточных испытаниях.

Предложенный подход позволяет оценивать количество циклов до зарождения трещин на любой высоте вертикального шва, за исключением зоны уторного узла. Следовательно, монтажная организация получает инструмент для обоснования необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ или приемки конструкции с допускаемыми дефектами исходя из расчетного срока службы (количества циклов нагружения). Также сведения о количестве циклов могут быть использованы при планировании освидетельствования конструкций в зонах с дефектами.

Результаты исследования приведены при условии, что возможные пластические деформации при рулонировании и разворачивании листов не учитывались. Дальнейшие исследования будут включать учет данных процессов.

Список литературы

1. Зоидов К.Х., Медков А.А. Реализация крупных энергетических проектов в российской Арктике в рамках осуществления совместных инфраструктурно-интеграционных инициатив с Китаем и Индией // Региональные проблемы преобразования экономики. 2022. № 2 (136). С. 5–22. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2022-2-5-22> EDN: CPTHNK
2. Калашников В.В., Ковалев Л.Н. Геологические работы в Республике Саха (Якутия) за 100 лет // Руды и металлы. 2022. № 2. С. 6–24. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10007> EDN: HZH1HL
3. Воронина Е.П. Риски и управление ими при реализации проектов освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа // Научные труды Вольного экономического общества России. 2014. Т. 182. С. 190–197. EDN: TUFPJL
4. Зикеев В.Н., Филиппов Г.А., Шабалов И.П. Закономерности изменения механических свойств конструкционных сталей в ходе длительной эксплуатации и моделирование процессов старения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2014. № 4. С. 74–82. EDN: TBEWYJ
5. Kreckhovska H., Kulyk V., Vira V., Student O. Influence of long-term operation of the 17H1S steel on the main gas pipeline on the change of the mechanical properties // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 36. P. 334–341. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.043>
6. Jin X., Zhu B.Y., Xia X.X., Li Y.F., Liu X.B., Zhang Y.W., Xu C.L., Yin J., Jia W.Q. Study on the microstructure evolution and effect on mechanical properties of P92 steel during long term service // Materialia. 2024. Vol. 35. Article no. 102124. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102124>
7. Корнев О.А., Шувалов А.Н., Корнилова А.В., Ермаков В.А. Интегральный критерий выбора алюминиевого сплава для строительства резервуаров в условиях Арктики // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 6. С. 605–622. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-605-622> EDN: FWXOUY
8. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В. Цифровизация строительства на основе структуризации основных технологических решений на примере сооружения вертикальных стальных резервуаров // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 2. С. 17. EDN: WD1TEH
9. Дрындина И.В., Шумкаева Е.П., Ращепкина С.А. О возведении стальных вертикальных цилиндрических резервуаров методом рулонирования // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 2–1 (101). С. 213–217. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-2-1-213-217> EDN: OGDZXZ
10. Почтовик П.Г. Малоцикловая усталостная прочность металлических резервуаров нефтеперекачивающих станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Москва, 1985. 218 с.
11. Баканов А.А., Мирошник А.И., Пимонов М.В., Абабков Н.В. Механические свойства основного металла и металла сварных соединений после рулонирования листов на каркасы разных диаметров // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2020) : материалы XI Междунар. науч.-практической конф., Бийск, 22–23 октября 2020 года. Бийск : АГТУ им. И.И. Ползунова, 2020. С. 213–219. EDN: BVBVCH

12. Вагазова Д.Д., Тляшева Р.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния полотноща резервуара в процессе рулонирования на каркасы различных диаметров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 447–452. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-447-448> EDN: FXRKWX
13. Гильманишин Р.А., Ерофеев В.В., Шарафиев Р.Г., Якунов В.М. Исследование напряженно-деформированного состояния рулонированных полотнищ вертикальных цилиндрических резервуаров при их изготовлении и монтаже // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 4. С. 193–199. EDN: VTKTJL.
14. Клебанов Я.М., Бурмистров А.Г., Столяров Н.Н. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств материала рулонированных сварных соединений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 133–140 EDN: PYUQNB
15. Воронин Р.М., Вагазова Д.Д., Тляшева Р.Р., Кузеев И.Р. Влияние технологии сборки рулонированных резервуаров на усталостную долговечность // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 4. С. 147–155. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2025-4-147-148> EDN: WTMFCD
16. Комаров П.А. Определение радиуса вальцовки ремонтных вставок при ремонте стальных резервуаров, изготовленных методом рулонирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 4 (36). С. 215–220. EDN: QBUTOT.
17. Тянь В.К., Комаров П.А., Худяков О.В. Системный анализ и прогноз поведения металлоконструкций при ремонте стальных резервуаров, изготовленных методом рулонирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 435–438. EDN: PWMOST
18. Саидов Х.Р. Влияние поверхностных дефектов на усталостную долговечность элементов алюминиевых листовых конструкций, работающих в условиях изгиба: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1983. 224 с.
19. Cong J., Liu Z., Zhou S., Zhu X., Gao S. Fatigue life prediction of ultrasonic impact treatment aluminum alloy weld joint based on the continuous damage model and artificial neural network // Engineering Fracture Mechanics. 2025. Vol. 327. Article no. 111503. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2025.111503> EDN: FLDGIX
20. Wang Z., Zhang Z., Cheng J., Song G., Liu L. Simultaneously increased strength and plasticity of TIG-welded 7075-T6 aluminum alloy joints via a novel post-weld composite treatment process // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 26. P. 542–555. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.228> EDN: VQVBLB

References

1. Zoidov KH, Medkov AA. Implementation of major energy projects in the russian federation in the arctic as part of joint infrastructure and integration initiatives with China and India. *Regional Problems of Transforming the Economy*. 2022;(2):5–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2022-2-5-22> EDN: CPTHNK
2. Kalashnikov VV, Kovalev LN. Geological work in the Republic of Sakha (Yakutia) over 100 years. *Ores and Metals*. 2022;(2):6–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10007> EDN: HZHIHL
3. Voronina EP. Risks and risk management in the implementation of oil and gas development projects of the Arctic shelf. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2014;182:190–197. (In Russ.) EDN: TUFPJL
4. Zikeev VN, Filippov GA, Shabalov IP. Patterns in the change of mechanical properties of structural steels during long-term service and the modelling of ageing processes. *Problems in Ferrous Metallurgy and Material Science*. 2014;(4):74–82. (In Russ.) EDN: TBEWYJ
5. Krechkovska H, Kulyk V, Vira V, Student O. Regularities of changes in the mechanical properties of constructional steels during long-term operation and modeling of the aging processes. *Procedia Structural Integrity*. 2022;36:334–341. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.043>
6. Jin X, Zhu BY, Xia XX, Li YF, Liu XB, Zhang YW, Xu CL, Yin J, Jia WQ. Study on the microstructure evolution and effect on mechanical properties of P92 steel during long term service. *Materialia*. 2024;35:102124. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102124>
7. Kornev OA, Shuvalov AN, Kornilova AV, Ermakov VA. Integral criterion for the selection of aluminum alloy for the construction of reservoirs in the Arctic. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(6): 605–622. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-605-622> EDN: FWXOUY
8. Abramyan SG, Burlachenko OV, Oganessian OV. Construction digitization based on structuring of main technological solutions exemplified by vertical steel tanks. *Eurasian Scientific Journal*. 2024;14(2):17. (In Russ.) EDN: WDIETH
9. Dryndina IV, Shumkaeva EP, Rashchepkina SA. On the construction of steel vertical cylindrical tanks by the rolling method. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2025;2-1:213–217. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-2-1-213-217> EDN: OGDZXZ
10. Pochtovik PG. *Low-cycle fatigue strength of metal tanks at oil pumping stations*: [dissertation]. Moscow, 1985. (In Russ.)
11. Bakanov AA, Miroshnik AI, Pimonov MV, Ababkov NV. Mechanical properties of the base metal and the metal in welded joints following the coiling of sheets onto frames of various diameters. *Innovations in Mechanical Engineering*

(InMash-2020): *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference, Biysk, 22–23 October 2020. Biysk: I.I. Polzunov Altai State Technical University*, 2020. p. 213–219. (In Russ.) EDN: BVBVCH

12. Vagazova DD, Tlyasheva RR. Analysis of the stress-strain state of the tank panel in the process of rolling onto frames of various diameters. *Izvestiya Tula State University*. 2024;(10):447–452. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-447-448> EDN: FXRKWX

13. Gil'manshin RA, Erofeev VV, Sharafiev RG, Yakupov VM. Study of the stress-strain state of coiled sheets of vertical cylindrical tanks in the process of their manufacture and erection. *Petroleum Engineering*. 2015;13(4):193–199. (In Russ.) EDN: VTKTJL

14. Klebanov YaM, Burmistrov AG, Stolyarov NN. Deformation and strength property experimental study of a rolled weld material. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2012;3(35):133–140. (In Russ.) EDN: PYUQNB

15. Voronin RM, Vagazova DD, Tlyasheva RR, Kuzeev IR. The influence of rolled tank assembly technology on fatigue life. *Izvestiya Tula State University*. 2025;(4):147–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2025-4-147-148> EDN: WTMFCD

16. Komarov PA. Calculation the radius of the rolled inserts in during process of repair steel tanks manufacturing by method of rolling. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2012;4(36):215–220. (In Russ.) EDN: QBUTOT

17. Tyan VK, Komarov PA, Hudyakov OV. Systems analysis and the behaviour forecast of metal constructions at repair the steel tanks, made by the method of rolling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-2):435–438. (In Russ.) EDN: PWMOCT

18. Saidov HR. *The Effect of Surface Defects on the Fatigue Life of Components in Aluminum Sheet Structures Subjected to Bending*: [dissertation]. Moscow, 1983. (In Russ.)

19. Cong J, Liu Z, Zhou S, Zhu X, Gao S. Fatigue life prediction of ultrasonic impact treatment aluminum alloy weld joint based on the continuous damage model and artificial neural network. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;327: 111503. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111503> EDN: FLDGIX

20. Wang Z, Zhang Z, Cheng J, Song G, Liu L. Simultaneously increased strength and plasticity of TIG-welded 7075-T6 aluminum alloy joints via a novel post-weld composite treatment process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:542–555. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.228> EDN: VQVBLB