

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ДВУХОСНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА СТЕНКЕ ТРУБОПРОВОДА

Прокопьев Л.А.¹, Голиков Н.И.², Андреев Я.М.¹, Лукин Е.С.^{1,2}, Максимова Е.М.¹

*¹Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск;*

*²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск*

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, Т-напряжения, коэффициент биаксиальности, остаточные сварочные напряжения, метод конечных элементов, трещина.

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного численного анализа влияния остаточных сварочных напряжений на напряженно-деформированное состояние у вершины трещины, расположенной на стенке трубопровода. Исследование выполнено с применением трехмерного моделирования методом конечных элементов для прямошовной трубы диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм, содержащей полуэллиптическую поверхностную трещину. Моделирование учитывало реальное распределение остаточных напряжений, возникающих при сварке, и их взаимодействие с эксплуатационными нагрузками от внутреннего давления. Анализ результатов выявил значительное влияние остаточных напряжений на параметры механики разрушения: коэффициент интенсивности напряжений, Т-напряжения, коэффициент биаксиальности. Учет остаточных напряжений приводит к возрастанию коэффициента интенсивности напряжений на 41-46% по сравнению с расчетами, учитывающими только рабочие нагрузки. Коэффициент биаксиальности увеличивается на 122%, что свидетельствует о формировании двухосного напряженного состояния. Наибольшие растягивающие напряжения зафиксированы на внутренней поверхности трубы, формируя зоны повышенной опасности для развития трещин. Проведенные расчетные оценки коррелируются с экспериментальными данными инструментальных измерений остаточных напряжений и характером разрушений участков газопроводов, что подтверждает адекватность применяемой методики моделирования и достоверность полученных результатов. Исследование подтвердило необходимость комплексного подхода при оценке трещиностойкости трубопроводов, учитывающего совместное действие остаточных сварочных напряжений и эксплуатационных факторов. Разработанная методика позволяет: точнее прогнозировать развитие трещиноподобных дефектов, объективнее оценивать остаточный ресурс конструкций, оптимизировать периодичность диагностических обследований. Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования методов неразрушающего контроля, обоснования нормативов по допустимым дефектам, разработки технологий ремонта сварных соединений, повышения безопасности эксплуатации трубопроводов в северных регионах.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL WELDING STRESSES ON BI-AXIALITY PARAMETERS OF STRESS STATE AT THE CRACK TIP IN PIPELINE WALL

Prokopyev L.A.¹, Golikov N.I.², Andreev Ya.M.¹, Lukin E.S.^{1,2}, Maksimova E.M.¹

*¹Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk;*

*²V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk*

Keywords: stress intensity factor, T-stress, biaxiality ratio, residual welding stresses, finite element analysis, crack.

Abstract. The article presents the results of a comprehensive numerical analysis of the influence of residual welding stresses on the stress-strain state at the tip of a crack located on the pipeline wall. The study was performed using three-dimensional finite element modeling of a 530 mm diameter straight-seam pipe with a 7 mm wall thickness, containing a semi-elliptical surface crack. The simulation accounted for the actual distribution of residual stresses arising from welding and their interaction with operational loads from internal pressure. Analysis of the results revealed a significant influence of residual stresses on fracture mechanics parameters: stress intensity factor, T-stresses, and biaxiality ratio.

Accounting for residual stresses leads to an increase in the stress intensity factor by 41-46% compared to calculations considering only operational loads. The biaxiality ratio increases by 122%, indicating a transition to a significantly biaxial stress state. The highest tensile stresses were recorded on the inner surface of the pipe, forming zones of increased risk for crack propagation. The computational estimates correlate with experimental data from instrumental measurements of residual stresses and the failure patterns of gas pipeline sections, confirming the adequacy of the applied modeling methodology and the reliability of the obtained results. The study confirmed the necessity of a comprehensive approach to assessing pipeline fracture toughness, which considers the combined effect of residual welding stresses and operational factors. The developed methodology enables: more accurate prediction of crack-like defect growth, more objective assessment of the residual life of structures, and optimization of the frequency of diagnostic inspections. The obtained results are of practical importance for improving non-destructive testing methods, justifying standards for permissible defects, developing repair technologies for welded joints, and enhancing the operational safety of pipelines in northern regions.

Введение

Сварные соединения трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях экстремально низких температур, представляют особую область междисциплинарных исследований, включающую механику разрушения, хладостойкость и технологии сварки. Эта проблема обусловлена сложным взаимодействием остаточных сварочных напряжений (ОСН), рабочих нагрузок и температурного охрупчивания конструкционных материалов. Многочисленные исследования показывают, что остаточные напряжения, достигающие предела текучести материала, формируют в зоне сварного соединения специфическое двухосное напряженно-деформированное состояние (НДС), которое в сочетании с низкотемпературной эксплуатацией может значительно снижать трещиностойкость конструкции [1-5].

Современные подходы к анализу данной проблемы учитывают три ключевых аспекта: пространственное распределение остаточных напряжений, изменение характера напряженного состояния вблизи концентраторов напряжений, а также синергетический эффект низких температур, проявляющийся в значительном росте коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и одновременном снижении сопротивления хрупкому разрушению. При этом традиционные методы оценки надежности зачастую не учитывают комплексного влияния этих факторов, что приводит к необходимости разработки новых подходов к оценке опасности и остаточного ресурса конструкций.

В условиях низких климатических температуркратно увеличивается вероятность хрупкого разрушения элементов ответственных конструкций, что делает необходимым всестороннее исследование поведения трещинообразных дефектов в условиях сложного НДС.

Для обеспечения долговременной работоспособности и безопасности сварных конструкций необходим системный подход, объединяющий передовые методики исследования НДС, лабораторные испытания и численное моделирование. Анализ воздействия остаточных сварочных напряжений дает возможность: более точно установить предельно допустимые эксплуатационные параметры, создать усовершенствованные методы неразрушающего контроля, оптимизировать сварочные технологии для снижения уровня остаточных напряжений.

Научные исследования [6] свидетельствуют, что остаточные напряжения по-разному влияют на эксплуатационную долговечность сварных соединений в зависимости от их величины и характера распределения. Согласно данным [7-9], растягивающие остаточные напряжения оказывают негативное воздействие, снижая предел выносливости, тогда как сжимающие напряжения способствуют повышению усталостной прочности.

В предыдущих исследованиях [10, 11] рентгеновским методом изучены остаточные напряжения в продольных сварных соединениях трубопроводов диаметром 530 мм (толщина стенки 7 мм). Результаты показали наличие в околошовной зоне растягивающих напряжений, приближающихся к пределу текучести основного металла. Данное явление объясняется изгибом оболочки трубы вследствие деформаций сварного шва, что приводит к формированию: растягивающих напряжений на внутренней поверхности и сжимающих напряжений на наружной поверхности.

Анализ эксплуатационных повреждений [10] выявил закономерность: наиболее интенсивный рост трещин наблюдается в зонах действия растягивающих напряжений (внутренняя поверхность), что подтверждается значительной разницей в длинах трещин на противоположных сторонах стенки трубы.

Для углубленного изучения влияния поля остаточных напряжений на развитие трещин в сварных соединениях трубопроводов, в настоящей работе поставлена следующая цель работы: моделирование влияния остаточных сварочных напряжений на параметры двухосности напряженного состояния у вершины продольной трещины на трубопроводе. Задачи исследования: проведение расчёта НДС, параметров механики разрушения (КИН, Т-напряжений) модели трубопровода с трещиной под действием рабочего давления и ОСН; сравнение коэффициентов биаксиальности у вершины трещины без учёта ОСН и с учётом влияния поля ОСН.

Математическая постановка задачи, численный алгоритм анализа

Для оценки влияния остаточных сварочных напряжений на напряженно-деформированное состояние в окрестности продольной трещины проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). Исследование выполнено для участка трубопровода диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм (рис. 1).

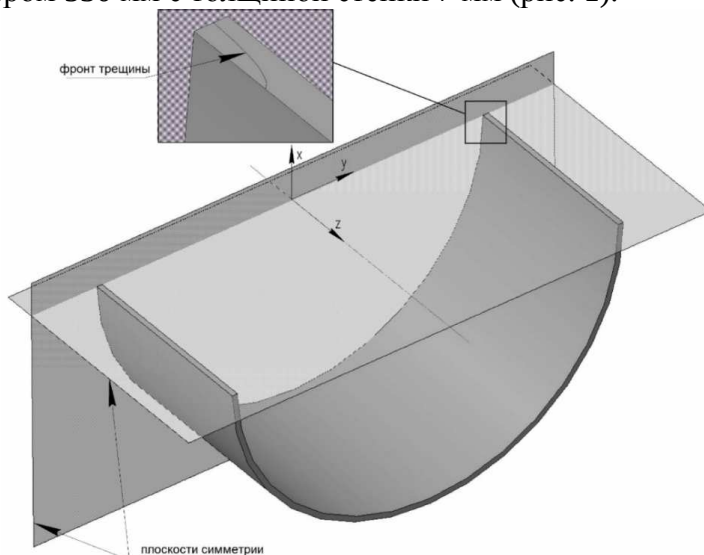


Рис. 1. Схема расположения поверхностной полуэллиптической трещины в зоне сварного шва участка трубопровода

Материал трубопровода сталь марки 09Г2С, имеющий следующие механические характеристики: модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Ввиду симметрии задачи моделировалась часть трубопровода с наложением соответствующих граничных условий. На внешней поверхности трубопровода задана полуэллиптическая поверхностная трещина с глубиной 1 мм и длиной 8 мм. Выполнено сгущение сетки конечных элементов в области вершины трещины. Использованы 20-узловые трехмерные элементы «SOLID186». Общий вид конечно-элементной сетки показан на рисунке 2.

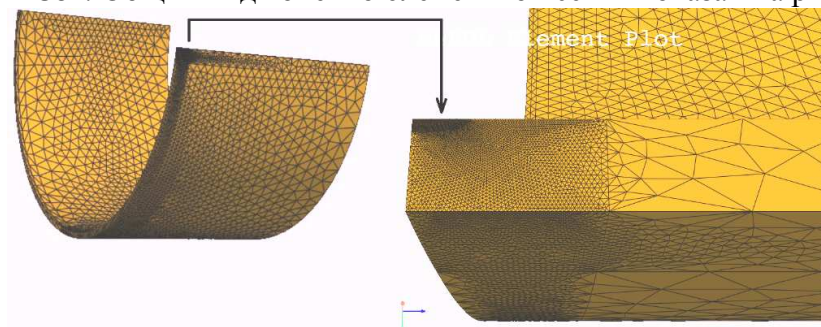


Рис. 2. Вид конечно-элементной сетки в окрестности вершины трещины

Разработан специализированный численный алгоритм, реализованный в среде Python с использованием интерфейса к конечно-элементному пакету ANSYS. Алгоритм включает следующие ключевые этапы: на первом этапе выполняется параметрическое задание геометрии трубопровода, содержащего полуэллиптическую поверхностную трещину. Геометрическая модель строится с учетом симметрии задачи, что позволяет сократить вычислительные затраты. Особое внимание уделено точному описанию формы сварного шва и трещины, для чего реализована процедура генерации координат точек эллиптического фронта трещины.

МКЭ применяется для решения трехмерной задачи механики деформируемого твердого тела. Сеточная модель строится с концентрацией элементов в окрестности вершины трещины, что обеспечивает точность расчета КИН. Размеры конечных элементов в зоне концентрации напряжений выбираются на основе анализа сходимости решения.

Алгоритм предусматривает последовательное решение двух задач: сначала анализируется напряженное состояние от действия только рабочих нагрузок (внутреннего давления), затем учитывается комбинированное воздействие рабочих и остаточных сварочных напряжений. На внутренней поверхности трубопровода приложено давление от рабочих нагрузок, равное 5 МПа. Остаточные напряжения задаются в соответствии с инструментально измеренными данными о их распределении в сварных соединениях [10, 12, 13]. Распределение ОСН по толщине трубопровода задано в следующем виде: на внешней половине толщины стенки действуют сжимающие напряжения величиной 200 МПа, на внутренней – растягивающие, равные 450 МПа.

Для анализа параметров трещиностойкости реализованы процедуры расчета: КИН – методом контурного интегрирования; Т-напряжений, характеризующих степень двухосности напряженного состояния.

Распределение компонентов напряжений в трубопроводе при действии рабочих нагрузок (внутреннего давления) без учета остаточных сварочных напряжений представлено на рисунке 3.

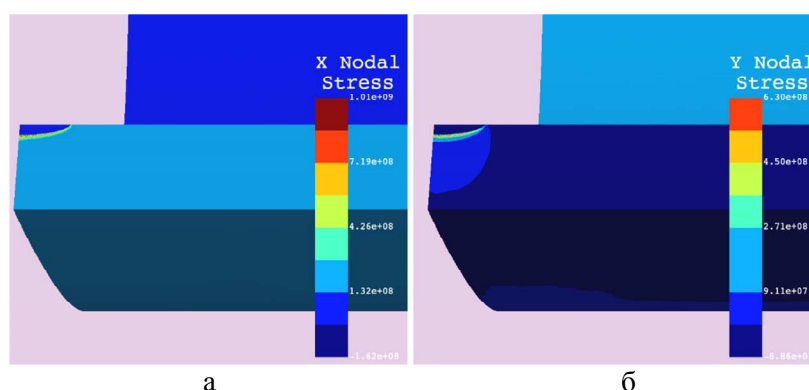


Рис. 3. Распределение компонентов напряжений по радиальному (а) и поперечному (б) направлениям при действии рабочих нагрузок без учета остаточных напряжений

Распределение компонентов напряжений при комбинированном воздействии рабочих нагрузок и остаточных сварочных напряжений показано на рисунке 4. В радиальном направлении прослеживается влияние остаточных напряжений на общую картину напряженного состояния (рис. 4, а). В поперечном направлении (рис. 4, б) видно изменение характера распределения напряжений по сравнению с рисунком 3, обусловленное наложением остаточных сварочных напряжений.

Одной из задач данной работы является исследование влияния ОСН на двухосность НДС у вершины трещины. Коэффициент биаксиальности (1) является важным безразмерным параметром B , характеризующим степень двухосности напряженного состояния в зоне концентрации напряжений [14].

$$B = \frac{T\sqrt{\pi l}}{K_1}, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, T – Т-напряжения, l – длина трещины.

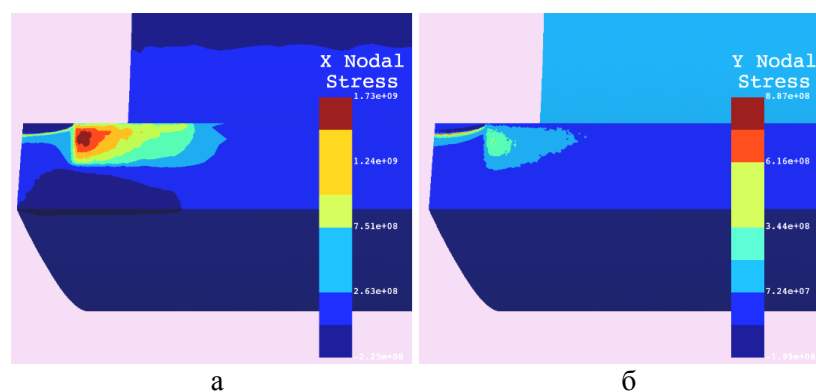


Рис. 4. Распределение компонентов напряжений по радиальному (а) и поперечному (б) направлениям при комбинированном воздействии рабочих нагрузок и остаточных сварочных напряжений

Значение коэффициента биаксиальности существенно влияет на характер разрушения материалов. При значениях B , близких к нулю, реализуется классическое одноосное напряженное состояние, характерное для большинства задач механики разрушения. Однако при увеличении коэффициента биаксиальности свыше 0,3 наблюдается значительное изменение картины разрушения – происходит трансформация формы пластической зоны, модифицируется механизм разрушения и изменяются критические параметры трещиностойкости. В случае отрицательных значений коэффициента, соответствующих сжимающим Т-напряжениям, отмечается увеличение пластической зоны и повышение сопротивления материала разрушению.

Экспериментальные и теоретические исследования подтверждают влияние коэффициента биаксиальности на кинетику роста трещин, форму и размеры пластической зоны, а также на условия перехода от стабильного к нестабильному развитию трещины [14-16].

В результате проведенных исследований определены параметры трещиностойкости, характеризующие поведение сварного соединения трубопровода при различных условиях нагружения. Полученные количественные оценки представлены в таблице 1, где представлены данные для двух расчетных случаев: при действии только рабочих нагрузок (внутреннего давления) и при комбинированном воздействии рабочих нагрузок и остаточных сварочных напряжений.

Анализ представленных в таблице данных позволяет выявить влияние остаточных сварочных напряжений на рассматриваемые параметры трещиностойкости. Наибольшие изменения наблюдаются в значениях Т-напряжений, величина которых возрастает, что свидетельствует об изменении НДС в окрестности трещины. Значение КИН увеличивается на 41-46% в зависимости от рассматриваемой точки на фронте трещины. При учете ОСН значение коэффициента биаксиальности возрастает с 0,23 до 0,51.

Табл. 1. Сравнение параметров трещиностойкости в зависимости от вида нагрузки

Параметр	Место расположения точки расчета	При действии рабочих нагрузок	При комбинированном воздействии рабочих и остаточных сварочных напряжений
КИН, МПа $\cdot\sqrt{м}$	На поверхностной точке	28,4	41,6
КИН, МПа $\cdot\sqrt{м}$	На глубинной точке	32,1	45,3
Т-напряжения, МПа		85	210
Коэффициент биаксиальности		0,23	0,51

Обсуждение результатов

Проведенное численное моделирование МКЭ позволило выявить значительное влияние ОСН на параметры трещиностойкости трубопроводов. Полученные результаты демонстрируют, что наличие ОСН приводит к изменению характера НДС в окрестности продольной трещины.

Результаты показывают значительное увеличение КИН при учете остаточных напряжений, что согласуется с данными других исследователей [1, 2] и объясняется наложением остаточных растягивающих напряжений на поле рабочих напряжений. Наибольший рост КИН наблюдается в поверхностных точках трещины, что может быть связано с особенностями распределения остаточных напряжений вблизи поверхности трубопровода.

Также расчеты при комбинированном воздействии рабочих и остаточных сварочных напряжений показывают высокие значения Т-напряжений и коэффициента B по сравнению с расчетом без учета остаточных напряжений. Проведенный анализ свидетельствует о значительном влиянии поля остаточных напряжений на НДС у вершины трещины, которое проявляется в смещении последнего в сторону двухосного. Установленная корреляция результатов расчета с экспериментальными данными по ОСН и характером разрушения газопроводов [12] свидетельствует об адекватности примененной модели и достоверности полученных результатов. Таким образом, остаточные напряжения могут обуславливать снижение сопротивления хрупкому разрушению, увеличить скорость роста трещины и переход механизма разрушения с вязкого на хрупкий. Данные результаты подтверждают необходимость особого подхода к оценке трещиностойкости трубопроводов, работающих в условиях Севера и Арктики.

Заключение

Проведено комплексное численное моделирование напряженно-деформированного состояния сварного соединения трубопровода с учетом ОСН. Установлено, что остаточные напряжения вызывают значительное увеличение коэффициента интенсивности напряжений (на 41-46%) и коэффициента биаксиальности (с 0,23 до 0,51). Выявлено изменение характера напряженного состояния в окрестности трещины при наложении остаточных напряжений.

Таким образом, обоснована необходимость рассмотрения коэффициента биаксиальности при анализе трещиностойкости сварных соединений элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур.

Финансирование. Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН». Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2025-0025, FWRS-2024-0034.

Список литературы

1. Сараев Ю.Н., Гладковский С.В., Голиков Н.И., Киселев А.С., Безбородов В.П., Гордынец А.С., Лунев А.Г., Чинахов Д.А., Хайдарова А.А., Тригуб М.В. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур // Наукоемкие технологии в проектах РНФ. Сибирь. – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С.134-202.
2. Матохин Г.В., Воробьев А.Ю., Игуменов А.А. Оценка влияния остаточных сварочных напряжений на предел выносливости различных зон сварных соединений ферритоперлитных сталей // Сварка и диагностика. – 2015. – № 1. – С. 32-34.
3. Ma N., Murakawa H., Ueda Y. Welding deformation and residual stress prevention. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 29 p. – DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9.
4. Jiang X., Wang W., Xu C., Li J., Lu J. Effect of Process Parameters on Welding Residual Stress of 316L Stainless Steel Pipe // Materials. 2024, vol. 17, p. 2201. <https://doi.org/10.3390/ma17102201>.
5. Liu Z., Zhang S., Mao Q., Zheng X.Y. Role of welding residual stress in stainless steel piping with application of the leak-before-break technology // Frontiers in Energy Research. 2023, vol. 10-2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1079476.

6. Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А. Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – №1(82). – С. 72-83.
7. Тажибаев А.Р., Тажибаева А.В., Бикбулатова Г.И. Методы выявления и снижения остаточных напряжений в сварных соединениях // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – №5(38). – С. 45-53.
8. Заворин А.С., Любимова Л.Л., Буваков К.В., Кулеш А.С., Ташлыков А.А., Кулеш Р.Н. Влияние остаточных напряжений в зонах сварного узла на сопротивление хрупким разрушениям // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – №10. – С. 128-142. –
9. Кириллова В.А., Рыбакова Л.Ю. Экспериментальное исследование остаточных сварочных напряжений стыкового сварного соединения толстолистовой стали // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №7. – С. 333-342.
10. Golikov N.I. Effect of residual stress on crack development in longitudinal welded joints of a gas pipeline // Procedia Structural Integrity. 2020, vol. 30, pp. 28-32. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.006.
11. Prokopyev L.A., Golikov N.I., Saraev Yu.N. Crack growth in the field of residual stresses in welded joints of pipelines used in a cold climate // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024, iss. 5, pp. 159-169. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169.
12. Deaconu V. Finite element modelling of residual stress – a powerful tool in the aid of structural integrity assessment of welded structures // 5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007). – Timisora, Romania, 2007.
13. Dong W.S., Zhang H.B., Bannister S., Connelly Martin A. Neutron Diffraction Measurement of Weld Residual Stresses in an UOE Linepipe Subjected to Mechanical Expansion // Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 3: Materials Technology; Ocean Space Utilization. – Nantes, France, 2013. – DOI: 10.1115/OMAE2013-11257.
14. Тырымов А.А. Численное моделирование Т-напряжений и коэффициента биаксиальности напряжений для образца с центральной трещиной при смешанных граничных условиях // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – №13(4). – С. 393-401. – doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.30.
15. Pisarev V.S., Matvienko Y.G., Eleonsky S.I., Odintsev I.N. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses // Engineering Fracture Mechanics. 2017, vol. 179, pp. 348-374. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.029.
16. Ayatollahi M.R., Rashidi Moghaddam M., Berto F. T-stress effects on fatigue crack growth – Theory and experiment // Engineering Fracture Mechanics. 2018, vol. 187, pp. 103-114. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.025.

References

1. Saraev Ya.N., Gladkovskiy S.V., Golikov N.I., Kiselev A.S., Bezborodov V.P., Gordynets A.S., Lunev A.G., Chinakhov D.A., Khaydarova A.A., Trigub M.V. Exploratory Research on Improving the Reliability of Critical Metal Structures Operating under Extreme Loads and Low Climatic Temperatures // High Technologies in RSF Projects. Siberia. – Tomsk: NTL Publishing, 2017. – Chapter 5. – P. 134-202.
2. Matokhin G.V., Vorobyev A.Yu., Igumenov A.A. Assessment of the Influence of Residual Welding Stresses on the Endurance Limit of Various Zones of Welded Joints in Ferritic-Pearlitic Steels // Welding and Diagnostics. 2015, no. 1, pp. 32-34.
3. Ma N., Murakawa H., Ueda Y. Welding deformation and residual stress prevention. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 29 p. – DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9.
4. Jiang X., Wang W., Xu C., Li J., Lu J. Effect of Process Parameters on Welding Residual Stress of 316L Stainless Steel Pipe // Materials. 2024, vol. 17, p. 2201. https://doi.org/10.3390/ma17102201.
5. Liu Z., Zhang S., Mao Q., Zheng X.Y. Role of welding residual stress in stainless steel piping with application of the leak-before-break technology // Frontiers in Energy Research. 2023, vol. 10-2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1079476.
6. Makarov A.P., Khramovskikh V.A., Nepomnyashchikh K.A. Ways to Reduce Residual Welding Stresses in Metal Structures of Quarry Excavators // Earth Sciences and Subsoil Use. 2023, no. 1(82), pp. 72-83.
7. Tazhibayev A.R., Tazhibayeva A.V., Bikbulatova G.I. Methods for Identifying and Reducing Residual Stresses in Welded Joints // Modern Materials, Machinery and Technologies. 2021, no. 5(38), pp. 45-53.
8. Zavorin A.S., Lyubimova L.L., Buvakov K.V., Kulesh A.S., Tashlykov A.A., Kulesh R.N. Influence of Residual Stresses in the Weld Assembly Zones on Resistance to Brittle Fracture // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018, no. 10, pp. 128-142.
9. Kirillova V.A., Rybakova L.Yu. Experimental Study of Residual Welding Stresses in a Butt Welded Joint of Thick Steel Plate // Don Engineering Bulletin. 2023, no. 7, pp. 333-342.
10. Golikov N.I. Effect of residual stress on crack development in longitudinal welded joints of a gas pipeline // Procedia Structural Integrity. 2020, vol. 30, pp. 28-32. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.006.
11. Prokopyev L.A., Golikov N.I., Saraev Yu.N. Crack growth in the field of residual stresses in welded joints of pipelines used in a cold climate // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024, iss. 5, pp. 159-169. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169.

12. Deaconu V. Finite element modelling of residual stress – a powerful tool in the aid of structural integrity assessment of welded structures // 5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007). – Timisora, Romania, 2007.
13. Dong W.S., Zhang H.B., Bannister S., Connelly Martin A. Neutron Diffraction Measurement of Weld Residual Stresses in an UOE Linepipe Subjected to Mechanical Expansion // Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 3: Materials Technology; Ocean Space Utilization. – Nantes, France, 2013. – DOI: 10.1115/OMAE2013-11257.
14. Tyrymov A.A. Numerical Modeling of T-Stresses and Stress Biaxiality Ratio for a Center-Cracked Specimen under Mixed Boundary Conditions // Computational Continuum Mechanics. 2020, no. 13(4), pp. 393-401. doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.30.
15. Pisarev V.S., Matvienko Y.G., Eleonsky S.I., Odintsev I.N. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses // Engineering Fracture Mechanics. 2017, vol. 179, pp. 348-374. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.029.
16. Ayatollahi M.R., Rashidi Moghaddam M., Berto F. T-stress effects on fatigue crack growth – Theory and experiment // Engineering Fracture Mechanics. 2018, vol. 187, pp. 103-114. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.025.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Прокопьев Леонид Александрович – научный сотрудник	Prokopyev Leonid Aleksandrovich – researcher
Голиков Николай Иннокентьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник	Golikov Nikolai Innokentevich – doctor of engineering sciences, chief research scientist
Андреев Яков Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Andreev Yakov Mikhaylovich – candidate of technical sciences, senior researcher
Лукин Евгений Саввич – кандидат технических наук, и.о. директора; старший научный сотрудник	Lukin Evgeniy Savvich – candidate of technical sciences, acting director; senior researcher
Максимова Екатерина Михайловна – научный сотрудник	Maksimova Ekaterina Mikhaylovna – researcher
l.prokopyev@yandex.ru	

Получена 10.10.2025