



Received: 18.06.2024
Revised: 30.09.2024
Accepted: 25.10.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169

CRACK GROWTH IN THE FIELD OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS OF PIPELINES USED IN A COLD CLIMATE

L. A. Prokopyev^{1, a, *}, N. I Golikov^{2, b}, and Yu. N. Saraev^{2, c}

¹Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",
2 Petrovskogo St., Yakutsk, 677000, Russia

²V. P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677000, Russia

a)  <https://orcid.org/0000-0001-7048-3341>  l.prokopyev@yandex.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>  n.i.golikov@mail.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-9457-4309>  saraev.73@yandex.ru

*Corresponding author. Email: l.prokopyev@yandex.ru
Address for correspondence: ul. Petrovskogo, 2, Yakutsk, 677000, Russia
Tel.: +7 (4112) 39-0501; fax: +7 (4112) 39-0525

The problem of the influence of residual welding stresses (RWS) on the process of crack propagation is considered. Finite element modeling of the growth of a semi-elliptical longitudinal crack in the RWS field is performed. To gain a more complete understanding of the process mechanics, the calculation results obtained in view of residual stresses are compared to those obtained without regard for residual stresses. The obtained results are indicative of a significant effect of the level and distribution of RWS on crack propagation. In particular, the complex stress-strain state induced by residual stresses is shown to influence essentially the forming and further growth of cracks located on the inner surface of the pipeline wall. Besides, it is found that the form of crack growth specified by residual welding stresses makes them hard to detect with the application of classical instrumented testing methods. The complex distribution of stresses may cause data corruption and, consequently, difficulties in the correct interpretation of crack shape and size. This, in turn, may significantly complicate planning and performing repair work, and this necessitates the development and use of more accurate diagnostic techniques taking into account the effect of residual stresses. The research results emphasize the importance of taking into account RWS when predicting the behavior of cracks in pipelines and planning their service and repair. Further research in this direction can contribute to creating more reliable and effective techniques for estimating the health of welded joints, this being crucial for the industrial safety and economic efficiency of operating procedures.

Keywords: stress intensity factor, residual welding stresses, crack growth, finite element method

Acknowledgment

The work was performed with the use of the scientific equipment of the YaSC SB RAS shared core facilities under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education (R&D No. 122042000005-4, FWRS-2022-0002).

References

1. Saraev, Yu.N., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I., Kiselev, A.S., Bezborodov, V.P., Gordynets, A.S., Lunev, A.G., Chinakhov, D.A., Khaydarova, A.A., and Trigub, M.V. Exploratory



- studies on improving the reliability of critical-use metal structures operating under extreme loads and low climatic temperatures. In: *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir* [High-Tech Technologies in RSF Projects. Siberia, eds., S.G. Psakhye and Yu.P. Sharkeev]. NTL Publ., Tomsk, 2017, ch. 5, pp. 134–202. (In Russian).
2. Matokhin, G.V., Vorobyev, A.Yu., and Igumenov, A.A. Estimation of the influence of residual welding stresses on the endurance limit of various zones of welded joints of ferrite-pearlitic steels. *Svarka i Diagnostika*, 2015, 1, 32–34. (In Russian).
 3. Terada, H. Stress intensity factor analysis and fatigue behavior of a crack in the residual stress field of welding. *Journal of ASTM International*, 2005, 2 (5), 58–68. DOI: 10.1520/JAI12558.
 4. Ma, N., Murakawa, H., and Ueda, Y. *Welding deformation and residual stress prevention*, Butterworth–Heinemann, Oxford, 2012, 292 p. DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9.
 5. Kopelman, L.A. *Soprotivlyaemost svarnykh uzlov khrupkomu razrusheniyu* [Resistance of Welded Joints to Brittle Fracture]. Mashinostroenie Publ., Leningrad, 1978, 232 p. (In Russian).
 6. Makarov, A.P., Khramovskikh, V.A., and Nepomnyashchikh, K.A. Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures. *Nauki o Zemle i Nedropolzovanie*, 2023, 1 (82), 72–83. (In Russian).
 7. Tazhibayev, A.R., Tazhibayeva, A.V., and Bikbulatova, G.I. Methods for detecting and reducing residual voltage in welded connections. *Sovremennyye Materialy. Tekhnika i Tekhnologii*, 2021, 5 (38), 45–53. (In Russian).
 8. Zavorin, A.S., Lyubimova, L.L., Buvakov, K.V., Kulesh, A.S., Tashlykov, A.A., and Kulesh, R.N. Influence of residual stresses on resistance to brittle fracture in weldment zones. *Izvestiya TPU. Inzhiniring Georesurov*, 2018, 329 (10), 128–142. (In Russian). DOI: 10.18799/24131830/2018/10/2112.
 9. Kirillova, V.A. and Rybakova, L.Yu. Experimental study of residual welding stresses in a butt welded joint of thick steel. *Inzhenernyi Vestnik Dona*, 2023, 7 (103), 333–342. Available at: <http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n7y2023/8560>
 10. Golikov, N.I. Effect of residual stress on crack development in longitudinal welded joints of a gas pipeline. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 30, 28–32. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.006.
 11. Deaconu, V. Finite element modelling of residual stress – a powerful tool in the aid of structural integrity assessment of welded structures. In: *5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007)*, Timisoara, Romania, November 20–21, 2007. Available at: <https://www.ndt.net/article/iscs2007/papers/10.pdf>



Подана в журнал: 18.06.2024

УДК 539.421.2

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН В ПОЛЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Л. А. Прокопьев^{1, а, *}, Н. И. Голиков^{2, б}, Ю. Н. Сараев^{2, в}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
ул. Петровского, 2, г. Якутск, 677000, Россия

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Октябрьская, 1, г. Якутск, 677000, Россия

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0001-7048-3341>  l.prokopyev@yandex.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>  n.i.golikov@mail.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-9457-4309>  saraev.73@yandex.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: l.prokopyev@yandex.ru
Адрес для переписки: ул. Петровского, д. 2, г. Якутск, 677000, Россия
Тел.: +7 (4112) 39-05-01; Факс: +7 (4112) 39-05-25

В работе рассмотрена проблема влияния остаточных сварочных напряжений на процесс распространения трещины в сварном соединении трубопровода. Проведено конечно-элементное моделирование роста несквозной полуэллиптической продольно расположенной трещины в поле остаточных сварочных напряжений. Для более полного понимания механики процесса проведено сопоставление результатов расчетов, полученных с учетом и без учета остаточных напряжений. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии уровня и распределения остаточных сварочных напряжений на развитие трещин. В частности, показано, что сложное напряженно-деформированное состояние, вызванное остаточными напряжениями, оказывает существенное воздействие на формоизменение и дальнейший рост трещин, расположенных на внутренней поверхности стенки трубопровода. Кроме того, установлено, что характер роста трещин, обусловленный остаточными сварочными напряжениями, представляет значительные сложности для их выявления с использованием традиционных приборных методов контроля. Сложное распределение напряжений может приводить к искажению данных и, следовательно, к трудностям в правильной интерпретации формы и размеров трещин. Это, в свою очередь, может значительно усложнить планирование и проведение ремонтных работ, что указывает на необходимость разработки и применения более точных методик диагностики, учитывающих влияние остаточных напряжений. Результаты исследования подчеркивают важность учета остаточных сварочных напряжений при прогнозировании поведения трещин в трубопроводах и при планировании мероприятий по их обслуживанию и ремонту. Дальнейшие исследования в этом направлении могут способствовать созданию более надежных и эффективных методик оценки технического состояния сварных соединений, что имеет критическое значение для промышленной безопасности и экономической эффективности эксплуатационных процессов.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, остаточные сварочные напряжения, рост трещины, метод конечных элементов



1. Введение

Процесс сварки оказывает существенное влияние на надежность создаваемых конструкций, работающих в различных условиях эксплуатации, в том числе при экстремально-холодном климате [1]. Это связано с наличием неизбежных факторов процесса сварки, которые могут спровоцировать преждевременное разрушение, снижающее общую эксплуатационную пригодность конструкций. Одним из таких значимых факторов являются остаточные сварочные напряжения (ОСН), возникающие в результате температурных градиентов и неоднородностей, образующихся при затвердевании и охлаждении сварочной ванны.

Остаточные сварочные напряжения представляют собой сложное напряженно-деформированное состояние, которое не исчезает после завершения сварочного процесса и остается в материале конструкции на длительное время. Эти напряжения могут достигать значительных величин и приводить к микроструктурным и макроструктурным изменениям в зоне соединения, создавая условия для формирования и развития трещин. Во взаимодействии с другими негативными факторами, такими как концентрация напряжений на дефектах, структурные несовершенства материала и неоднородность его свойств, ОСН могут значительно уменьшить срок службы сварных соединений, особенно для конструкций, эксплуатирующихся при климатически низких температурах [2–5].

При низких температурах материал конструкции становится более хрупким, что усиливает опасность, связанную с воздействием ОСН. Повышенная хрупкость материала приводит к снижению его сопротивления разрушению и к увеличению вероятности возникновения трещин. Вследствие этого при проектировании и эксплуатации сварных конструкций для условий эксплуатации при крайне низких температурах необходимо учитывать влияние ОСН.

Таким образом, при выполнении оценки ресурса сварного соединения конструкции необходимо учитывать воздействие поля ОСН. Прогнозирование долгосрочной надежности и безопасности эксплуатации таких сварных соединений требует комплексного подхода, включающего использование современных методов анализа напряженно-деформированного состояния, экспериментальные исследования и численное моделирование. Оценка влияния остаточных сварочных напряжений позволяет более точно определить допустимые эксплуатационные нагрузки, разработать эффективные методики неразрушающего контроля и установить оптимальные режимы сварки для минимизации возникающих напряжений. Это, в свою очередь, обеспечивает повышение общей надежности сварных соединений в условиях низкотемпературной эксплуатации и продлевает срок их службы.

2. Постановка задачи и методы решения

Известно, что остаточные напряжения оказывают различное влияние на долговечность сварных соединений в зависимости от их величины и характера распределения [6]. Неблагоприятными считаются растягивающие остаточные напряжения, которые снижают предел выносливости сварных соединений, тогда как сжимающие остаточные напряжения, наоборот, повышают усталостную прочность [7–9].

В ранее проведенной нами работе [10] экспериментально исследовались ОСН продольного заводского сварного соединения прямошовной трубы газопровода диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм, полученного сваркой токами высокой частоты (ТВЧ). Определение остаточных напряжений производилось рентгеновским методом. В ходе исследований было выявлено, что в околошовной зоне продольного сварного соединения с внутренней стороны труб образуются растягивающие ОСН, уровень которых близок к пределу текучести основного металла. Это связано с тем, что продольный шов трубы, сокращаясь в результате усадки, вызывает изгиб длинных оболочек. Вследствие изгиба образуются растягивающие ОСН с внутренней стороны трубы, а сжимающие – с наружной. Хотя при изготовлении труб про-

изводится термообработка сварных соединений, в данном случае эта процедура не позволила полностью снять ОСН.

Известны случаи [10] возникновения сквозных трещин в продольных швах при эксплуатации газопроводов. Проведенное при этом обследование позволило установить, что наиболее активный рост трещин наблюдается в зоне распространения растягивающих ОСН, т. е. с внутренней стороны стенки трубы. С наружной стороны труб длины обнаруженных трещин были существенно меньше по сравнению с обратной, т. е. внутренней, стороной. Выявленное расхождение в длинах поверхностных трещин объясняется распределением ОСН: растягивающие – с внутренней стороны, сжимающие – с наружной. Но для более точной оценки влияния поля ОСН на развитие трещин в сварных соединениях труб нами были поставлены следующие цель и задачи настоящей работы: моделирование роста полуэллиптической продольной трещины в поле остаточных напряжений сварного соединения трубопровода; проведение расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и коэффициента интенсивности напряжений (КИН) модели трубопровода с трещиной под действием рабочего давления и ОСН; сравнение динамики роста трещины без учета ОСН и с учетом влияния поля ОСН.

В работе проведен комплексный расчет влияния остаточных напряжений на распространение продольной несквозной трещины в трубопроводе. Данная расчетная схема включает метод конечных элементов (МКЭ) и расчет на усталостную прочность. Расчет выполняется в двух условиях: без учета остаточных напряжений и с включением в расчет поля остаточных напряжений. В результате одной итерации МКЭ-расчета определяется амплитуда КИН, которая используется для расчета прироста трещины на данной итерации. Промежуточные данные о НДС и координатах фронта трещины записываются в отдельный файл. Вычисленные новые координаты узлов фронта трещины используются в следующей итерации. Таким образом, формируется траектория распространения трещины под действием заданных нагрузок.

Модель трещины полуэллиптической формы расположена на внутренней поверхности трубопровода вдоль направления ее оси. На рис. 1 показана схема расположения трещины в теле трубопровода.

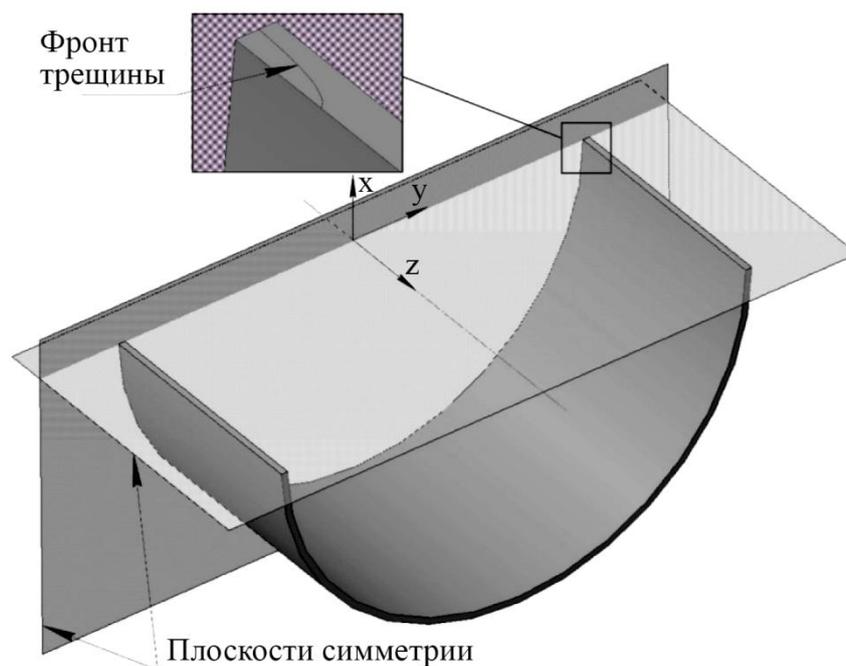


Рис. 1. Схема расположения полуэллиптической трещины в стенке трубопровода

Ввиду наличия симметрии по двум плоскостям, как показано на рис. 2, модель выполнена в виде половины части трубопровода. По плоскостям симметрии наложены граничные условия в виде ограничения перемещений, удовлетворяющие условиям симметрии. Геометрические размеры трубопровода приняты соответствующими размерам участка работающего магистрального газопровода. Внешний диаметр трубопровода принят равным 530 мм, а толщина стенки – 7 мм. Полудлина модели трубопровода принята равной 250 мм из условия достаточной удаленности дальнего торца от трещины и его малого влияния на локальное напряженно-деформированное состояние, возникающее у фронта трещины.

На внутренней поверхности трубопровода приложено давление от рабочих нагрузок, равное 5 МПа. В окрестности плоскости трещины заданы остаточные напряжения, соответствующие измеренным приборным значениям, действующие перпендикулярно к плоскости трещины. 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 [11]. Линия вершины трещины имеет полуэллиптическую начальную форму. Глубина трещины – 0,5 мм, ширина – 2 мм. Выполнено сгущение сетки конечных элементов в области вершины трещины. Использованы 20-узловые трехмерные элементы SOLID186. Проведен проверочный расчет модели трубопровода без трещины и ОСН. Расчетная погрешность компонентов напряжений, главных напряжений не превысила 1 % по сравнению с теоретическими значениями. Конечно-элементная модель показана на рис. 2.

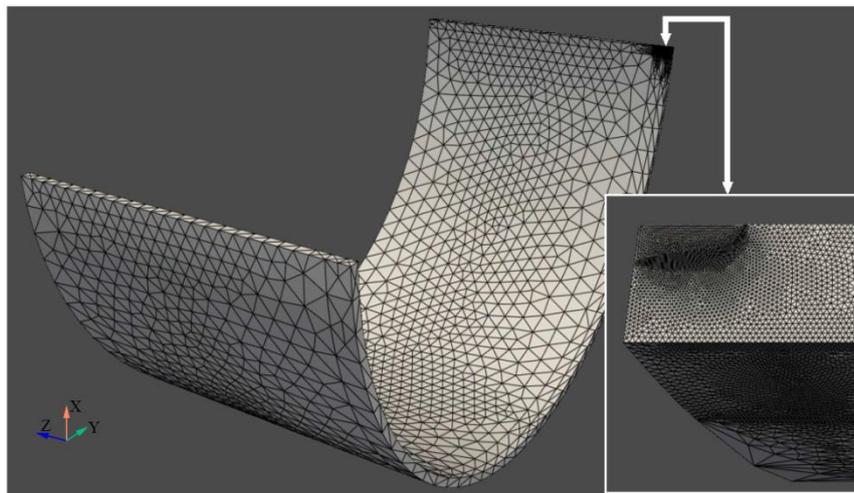


Рис. 2. Разбиение модели на сетку конечных элементов

С использованием инструментов пакета конечно-элементного анализа вычислены значения коэффициента интенсивности напряжений. Определение значений КИН производится встроенным в вычислительную программу методом интегрирования перемещений по нескольким контурам вокруг вершины трещины. Для каждого узла, принадлежащего линии фронта трещины, значение КИН усредняется по количеству контуров интегрирования. Результат вычислений НДС и значения КИН записываются в файл для дальнейшего расчета на усталостную прочность. Моделируется разгрузка рабочих напряжений до полного их отсутствия, ОСН остаются неизменными, рассчитывается амплитуда КИН. Рассчитывается этап стабильного роста трещины в соответствии с законом Пэриса со следующими коэффициентами: $m = 3,25$, $C = 2 \cdot 10^{-9}$. Определяется прирост трещины через определенное количество циклов нагружения. Вычисленные координаты узлов фронта трещины используются для проектирования геометрии модели для нового выполнения расчета. Средства автоматизированного проектирования позволяют использовать итеративный метод выполнения данных вычислительных задач.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны НДС у фронта трещины в двух случаях: с учетом остаточных напряжений и без включения в расчет остаточных напряжений. Визуально наблюдается действие остаточных растягивающих напряжений на внутренней поверхности стенки по направлению роста трещины вдоль оси трубопровода. Остаточные сжимающие напряжения, напротив, действуют ближе к внешней поверхности стенки, препятствуя росту трещины вглубь, к наружной поверхности стенки трубопровода.

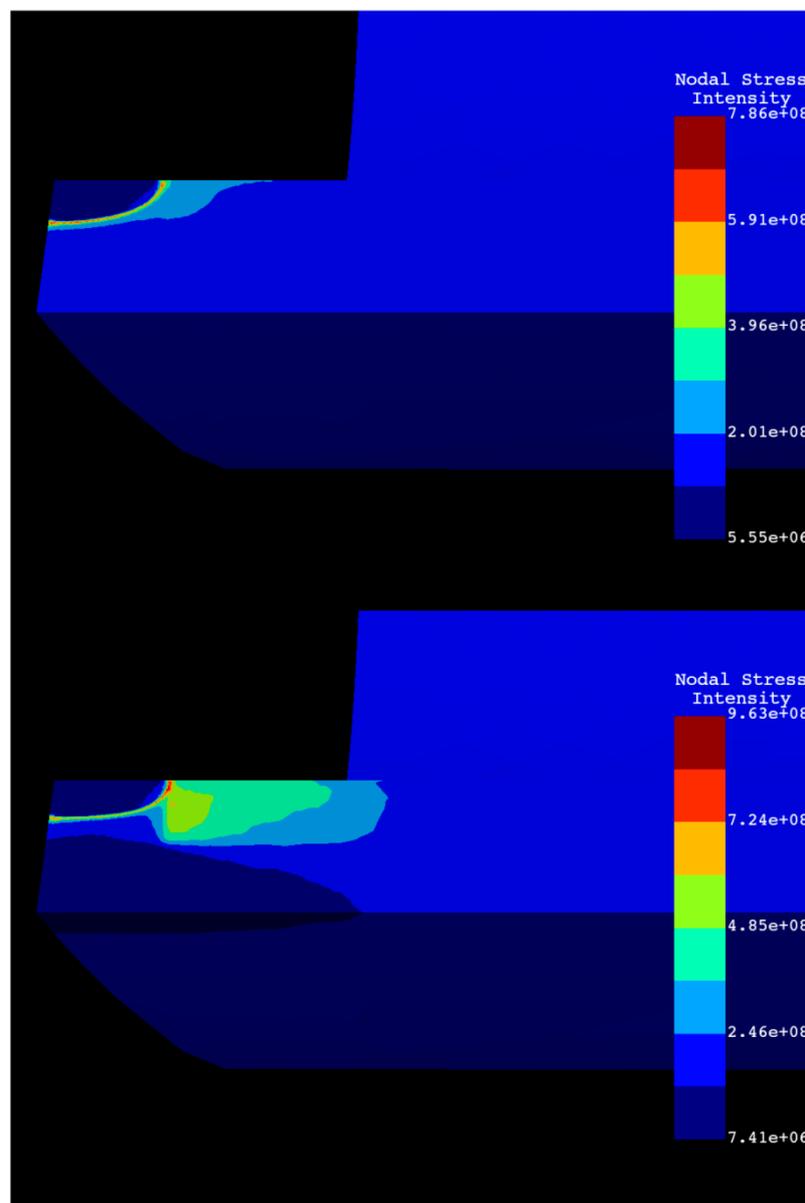


Рис. 3. НДС у вершины трещины: сверху – без остаточных напряжений, снизу – с учетом влияния остаточных напряжений

На рис. 4 показано развитие фронта трещины в поле остаточных напряжений и сравнение с условием, в котором отсутствует влияние остаточных напряжений. В условиях наличия поля остаточных напряжений виден значительный прирост трещины по направлению оси трубопровода, тогда как прирост при условии отсутствия остаточных напряжений по данному направлению практически отсутствует.

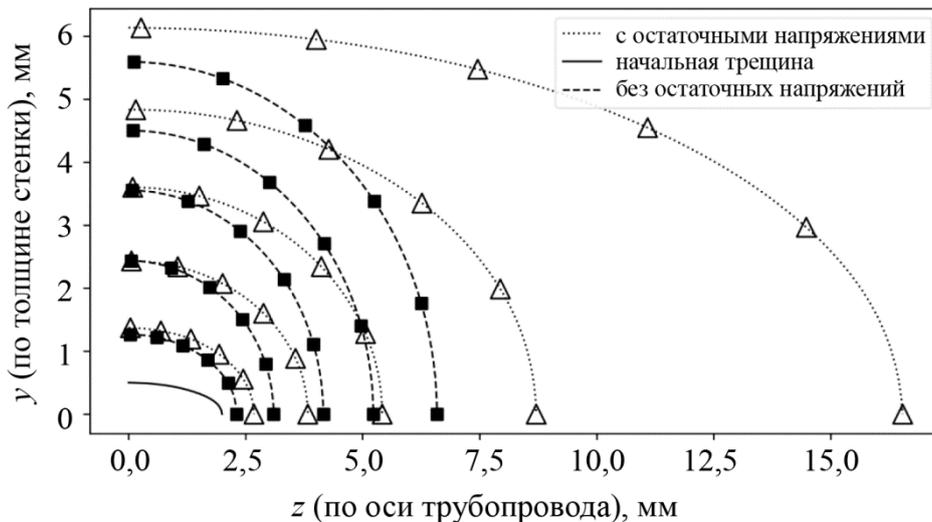


Рис. 4. Динамика усталостного развития фронта трещины

По результатам расчетов выявлено, что остаточные напряжения значительно влияют на распределение КИН по фронту трещины. Как видно из результатов расчета без учета ОСН, чем глубже по толщине расположен фронт трещины, тем больше значение КИН. Следовательно, дальнейший рост трещины будет происходить в сторону наружной поверхности стенки до тех пор, пока трещина не станет сквозной. ОСН, напротив, препятствуют росту трещины в глубину и способствуют росту трещины в ширину, по направлению оси трубопровода.

Вышеописанный характер распределения КИН по фронту трещины продемонстрирован на рис. 5. Распределение КИН по толщине стенки показано на верхних графиках. Можно заметить значительное увеличение значений КИН у внутренней поверхности стенки трубопровода ($y = 0$) при наличии остаточных напряжений (правый верхний график). На нижних графиках показано распределение КИН по направлению оси трубопровода. Также наблюдается значительное увеличение значений КИН у внутренней поверхности стенки и заметный рост трещины по оси z (нижний правый график).

Проведено сравнение конечных размеров трещины в момент, когда ее фронт достигает противоположной поверхности (трещина становится сквозной). Без учета остаточных напряжений значения прироста по осям y и z оказались приблизительно одинаковыми. При наличии остаточных напряжений прирост трещины в направлении оси трубопровода в момент ее выхода наружу оказался в три раза больше толщины стенки трубопровода. На данном примере, при толщине стенки 7 мм, прирост фронта трещины по оси z составил 20 мм. В целом скорость роста трещины при наличии остаточных напряжений увеличивается приблизительно в 1,75 раза. Результаты конечно-элементного моделирования сравнены с данными роста трещин в реальных сварных соединениях магистральных газопроводов. Было показано, что возникновение и рост макротрещин происходит в околошовной зоне сварных соединений тонкостенных магистральных газопроводов с внутренней стороны стенки трубы в зоне действия высоких растягивающих остаточных сварочных напряжений. При достижении фронта трещины противоположной стороны, когда трещина становится сквозной, ее форма приобретает вид, показанный на рис. 4. Ее особенностью является преобладание развития с внутренней стороны, в то время как с наружной стороны она остается визуально труднообнаружимой. Продольная длина трещины с внешней, визуально обнаруживаемой стороны, по сравнению с внутренними ее размерами, может отличаться в несколько раз. Если обнаружены подобные дефекты при планировании производства ремонтных работ, следует определить форму дефекта по всей толщине стенки трубопровода инструментальными методами контроля (например, ультразвуковым методом).

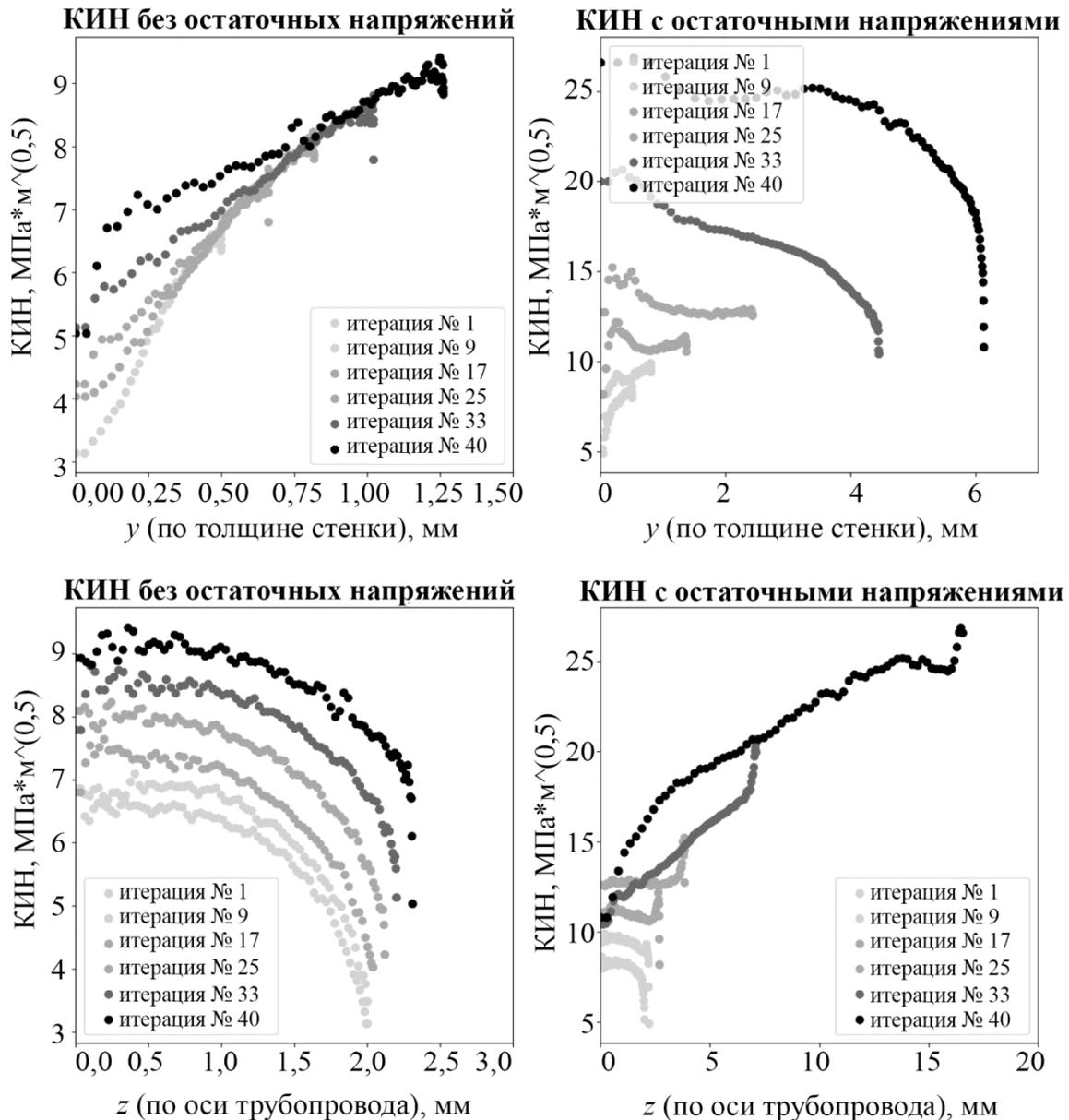


Рис. 5. Распределение КИН по фронту трещины (по координатам осей y и z)

4. Заключение

По результатам моделирования роста трещин в сварных соединениях тонкостенных магистральных газопроводов показано, что на их развитие могут существенно влиять уровень и характер распределения остаточных сварочных напряжений. Сложное напряженно-деформированное состояние, обусловленное ОСН, может существенно влиять на формоизменение и дальнейший рост трещин, расположенных на внутренней поверхности стенки трубопровода.

Характер распределения ОСН в подобных сварных соединениях обуславливает рост трещины вдоль оси трубопровода с внутренней стороны стенки, как показано на рис. 4. Максимальные значения КИН из-за воздействия ОСН приходится на ту часть фронта трещины, которая расположена близко к внутренней поверхности стенки трубопровода (рис. 5). По этой причине трещина имеет большую тенденцию к росту в ширину, по направлению оси z .



Для выбранной модели сравнительный анализ показал следующие результаты: максимальные значения КИН в случае наличия ОСН приблизительно в 2,7 раза превышают максимальные значения КИН в случае отсутствия ОСН.

Проведено сравнение конечных размеров трещины в момент, когда ее фронт достигает противоположной поверхности (трещина становится сквозной). Без учета остаточных напряжений значения прироста по осям y и z оказались приблизительно одинаковыми. При наличии остаточных напряжений прирост трещины в направлении оси трубопровода в момент ее выхода наружу оказался в три раза больше толщины стенки трубопровода. На данном примере, при толщине стенки 7 мм, прирост фронта трещины по оси z составил 20 мм.

Подобный характер роста трещин может затруднить их выявление приборными методами контроля и правильно интерпретировать форму и размеры трещины при планировании производства ремонтных работ.

Благодарность

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № НИОКТР 122042000005-4, FWRS-2022-0002).

Литература

1. Поискные исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю. Н. Сараев, С. В. Гладковский, Н. И. Голиков, А. С. Киселев, В. П. Безбородов, А. С. Гордынец, А. Г. Лунев, Д. А. Чинахов, А. А. Хайдарова, М. В. Тригуб // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С. Г. Псахье, Ю. П. Шаркеева. – Томск : Издательство НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С. 134–202. – ISBN 978-5-89503607-5
2. Матохин Г. В., Воробьев А. Ю., Игуменов А. А. Оценка влияния остаточных сварочных напряжений на предел выносливости различных зон сварных соединений феррито-перлитных сталей // Сварка и диагностика. – 2015. – № 1. – С. 32–34.
3. Hiroyuki T. Stress intensity factor analysis and fatigue behavior of a crack in the residual stress field of welding // Journal of ASTM international. – 2005. – Vol. 2 (5). – P. 58–68. – DOI: 10.1520/JAI12558.
4. Ma N., Murakawa H., Ueda Y. Welding deformation and residual stress prevention. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. – 292 p. – DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9. – ISBN 978-0-12-394804-5.
5. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 232 с.
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. Влияние остаточных напряжений в зонах сварного узла на сопротивление хрупким разрушениям / А. С. Заворин, Л. Л. Любимова, К. В. Буваков, А. С. Кулеш, А. А. Ташлыков, Р. Н. Кулеш // Известия ТПУ. – 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. – URL: <http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n7y2023/8560>



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. – P. 28–32. – DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.006.
11. 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, November 20–21, 2007. – URL: <https://www.ndt.net/article/iscs2007/papers/10.pdf>