

На правах рукописи

Дубовицкий Егор Игоревич

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА  
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В ЗОНЕ  
СВАРНОГО СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ**

Специальность: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре прикладной механики.

**Научный руководитель:**

**Покровский Алексей Михайлович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Киселев Алексей Сергеевич**  
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вероятностных методов расчета на прочность  
«Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Зорин Александр Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов Ухтинского государственного технического университета

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара)

Защита диссертации состоится 16 марта 2022 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу 105005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1. Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru). Телефон для справок: +7 (499)263-66-39

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., доцент



Мурашов  
Михаил Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Разрушение трубопроводов происходит, как правило, в окрестности сварного стыкового соединения. В связи с этим основной проблемой при оценке трещиностойкости и живучести трубопроводов является вычисление остаточных сварочных напряжений. Практически все технологические процессы, связанные с термонагружением (термообработка, сварка, наплавка и т.п.), приводят к неравномерности и нестационарности температурного поля в детали, что приводит к возникновению неупругих деформаций в изделии, и как следствие, возникновению остаточных напряжений. Причем процесс формирования остаточных технологических напряжений сильно осложняется протеканием фазовых и структурных превращений при остывании материала. Важность учета остаточных технологических напряжений при оценке трещиностойкости и живучести деталей, подверженных в процессе изготовления термонагружению, подчеркивает тот факт, что многочисленные литературные источники подтверждают возможность образования остаточных термонапряжений, сопоставимых по величине с пределом текучести материала, а также факты разрушения конструкций по причине наличия в них остаточных технологических напряжений.

Таким образом, разработка математических моделей расчета остаточных сварочных напряжений, а также оценки трещиностойкости и живучести трубопроводов в зоне сварного стыкового соединения является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в развитие теории сварки и родственных процессов внес Николаев Г.А. В своих научных трудах он подробно изложил природу возникновения остаточных напряжений, разработал достаточно простые, но в то же время обладающие приемлемой точностью аналитические методы расчета остаточных напряжений. Значительный вклад в развитие теории о прочности сварных конструкций внесли также Винокуров В.А. и Куркин С.А. Позже вопросами численного моделирования процесса сварки занимались Куркин А.С. и Киселев А.С.

Наибольших успехов в области вычисления остаточных напряжений при термонагружении добились Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Лошкарев А.С., Самойлович Ю.А., Покровский А.М.

Научные основы механики разрушения изложены в работах Гриффитса А., Дагдейла Д., Черепанова Г.П., Панасюка В.В., Морозова Е.М., Партон В.З., Махутова Н.А., Матвиенко Ю.Г., Irwin J., Westergaard H.M., Rise J.R. и других. Вопросы расчетной оценки трещиностойкости и живучести сварных стальных изделий, в том числе трубопроводов, в настоящее время не до конца изучены. При этом важным вопросом остается необходимость учета в таких оценках остаточных сварочных напряжений. В свою очередь, для достоверного моделирования процесса образования таких напряжений необходимо знать механические характеристики конкретной трубной стали.

В опубликованных к настоящему времени научных трудах задача расчета остаточных напряжений, как правило, решается в упрощенной упруго-пластической постановке, без учета деформаций ползучести. Достаточно часто при расчете остаточных сварочных напряжений используются стандартные конечно-элементные комплексы, например, Ansys, Nastran, Abaqus и другие, в которых остаточные термические напряжения вычисляются без учета структурных превращений.

Таким образом, разработка математических моделей расчета остаточных сварочных напряжений, а также оценка трещиностойкости и живучести трубопроводов в зоне стыкового сварного соединения представляют научный и практический интерес.

**Объектом исследования** служат трубопроводы, а **предметом исследования** являются методы вычисления остаточных сварочных напряжений и оценки трещиностойкости и живучести трубопроводов в зоне сварного стыкового соединения.

**Целью** работы является разработка методики анализа трещиностойкости и живучести трубопроводов с учетом остаточных сварочных напряжений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих расчетных моделей и подходов, используемых для решения задачи определения сварочных напряжений и оценки трещиностойкости и живучести трубопроводов;
2. На основе выбранных математических моделей разработать алгоритмы определения остаточных напряжений и дальнейшего анализа трещиностойкости и живучести. Реализовать алгоритмы в форме комплекса прикладных программ.
3. Провести экспериментальное определение характеристик пластичности и ползучести трубной стали, используемой при строительстве современных трубопроводов.
4. Реализовать тестирование разработанных программ и проверку достоверности результатов на основании сравнения с аналитическими решениями и экспериментальными данными.
5. Применить разработанную методику для решения практической задачи по оценке трещиностойкости и живучести реального магистрального трубопровода.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Проведено численное вычисление полей остаточных сварочных напряжений в трубопроводе при использовании модели упруго-вязко-пластической среды с нестационарной структурой.
2. Проведено экспериментальное исследование характеристик пластичности и ползучести трубной стали класса прочности К60, и получены уравнения состояния при пластичности и ползучести.
3. Разработан основанный на методе сечений численный метод вычисления коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для полуэллиптической продольной трещины в нагруженной внутренним давлением трубе;

4. Создан комплекс программ и моделей для расчета трещиностойкости и живучести трубопровода в зоне стыкового сварного соединения;

На защиту выносятся следующие положения диссертационной работы, обладающие элементами научной новизны:

1. Математическая модель расчета остаточных сварочных напряжений в зоне стыкового сварного соединения, основанная на решении задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестационарной структурой;

2. Результаты экспериментального исследования в широком температурном интервале характеристик пластичности и ползучести трубной стали класса прочности К60 в виде кривых растяжения и ползучести в различных структурных состояниях и уравнений состояния при пластичности и ползучести для материала с нестационарной структурой;

3. Основанный на методе сечений численный метод вычисления КИН по фронту полуэллиптической продольной трещины в нагруженной внутренним давлением трубе;

4. Методика расчета, реализованная в виде комплекса моделей и программ, позволяющая оценивать трещиностойкость и живучесть трубопроводов с учетом остаточных сварочных напряжений при зависимости критического значения КИН (вязкости разрушения) от структурного состава.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы состоит в обогащении теоретической научной базы в области расчета остаточных сварочных напряжений и оценке трещиностойкости и живучести трубопроводных систем с учетом этих напряжений. Разработанные в диссертации методики и алгоритмы внедрены в программу дисциплины «Теория прочности и механика разрушения» кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке математических моделей и комплекса программ для расчета на трещиностойкость и живучесть линейной части магистрального трубопровода. Предложенные методики, алгоритмы и программное обеспечение используются в курсовом и дипломном проектировании на кафедре «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также реализованы при расчетах на живучесть и трещиностойкость элементов авиационных конструкций в АО «РСК «МиГ».

**Методы исследования.** Решение осесимметричной задачи теплопроводности для стыковой сварки труб приводится в нелинейной нестационарной постановке. При решении используется метод конечных разностей. Моделирование перехода жидкой фазы в твердую при кристаллизации в процессе остывания сварного шва осуществлено на основании правила отрезков с использованием диаграммы состояния сплавов железо-углерод. Для перехода от изотермической кинетики превращений к неизотермической использовано правило аддитивности, справедливое для изокинетических реакций. Моделирование формирования остаточных сварочных напряжений осуществлено посредством решения задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестационарной структурой. Указанная задача решена методом дополнительных деформаций при помощи

основанного на вариационном принципе Лагранжа метода конечных элементов. В расчете применены теории пластичности и ползучести с изотропным упрочнением для материала с нестационарной структурой.

В основу анализа трещиностойкости трубопровода положен силовой критерий разрушения Ирвина, согласно которому расчетное значение суммарного КИН по фронту краевой полуэллиптической трещины от остаточных сварочных и эксплуатационных напряжений от внутреннего давления сравнивалось с вязкостью разрушения, зависящей от структуры металла. Оценка живучести трубопровода осуществлена шаговым методом посредством прогнозирования роста наиболее опасной краевой продольной трещины в глубину и длину на основании принципа автомодельности. При этом для вычисления приращения глубины и длины трещины на каждом шаге использована формула Пэриса, описывающая линейный участок кинетической диаграммы усталостного разрушения. Свидетельством разрушения являлось выполнение одного из условий: либо критерия Ирвина, либо достижения глубины трещины размера, равного толщине трубопровода.

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность разработанных алгоритмов подтверждается строгой формулировкой теоретических положений, положенных в основу математических моделей. Верификация разработанных методик, алгоритмов и программных средств осуществлена посредством решения модельных задач и сравнения расчетных значений с существующими экспериментальными данными. Достоверность результатов эксперимента подтверждается высокой точностью измерительной аппаратуры, испытанием необходимого количества образцов и статистической обработкой данных, снижающей погрешность до достоверного уровня.

**Апробация.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях: научный семинар НИИ ТРАНСНЕФТЬ (Москва, 2017); 2-я Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике» (Москва, 2017 г.); XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС-2018» (Москва, 2018); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019» (Москва, 2019); III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций (Улан-Удэ, 2019); X Annual International Meeting of the Georgian Mechanical Union (Georgia, Telavi, 2019); XI Annual International Meeting of the Georgian Mechanical Union (Georgia, Batumi, 2020); V Международная научно-техническая конференция в дистанционном формате Живучесть и конструкционное материаловедение «ЖивКом-2020» (Москва, 2020); научные семинары кафедры «Прикладная механика» Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана 2018-2021.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работа в издании, рецензируемом Scopus и 1 работа в издании, рецензируемом Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Общий объем состоит из 155 страниц, 67 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемых источников содержит 197 позиций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена цель работы, обоснована ее актуальность, приведены научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведен обзор литературных источников, посвященных рассматриваемой задаче. В силу комплексного характера исследования было выделено 4 основных направления: решение задачи теплопроводности при сварке и родственных процессах; математическое моделирование фазово-структурных превращений при охлаждении расплавленной стали; расчет остаточных напряжений; методы вычисления КИН и оценки трещиностойкости и живучести термонагруженных деталей.

Задача теплопроводности применительно к сварке трубопроводных систем может решаться как аналитическими, так и численными методами. Однако в случае нелинейной нестационарной постановки, используемой в настоящем исследовании, применимыми оказываются лишь численные методы. Наиболее распространенными являются метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ), причем МКР является более предпочтительным для тел простой формы. Анализ литературных источников показал, что при решении необходимо учитывать как зависимость теплофизических характеристик стали от температуры и структуры, так и выделение скрытой теплоты в процессе фазовых переходов при кристаллизации и в ходе структурных превращений. Большой вклад в развитие области численного решения задач теплопроводности внесли Зарубин В.С., Самарский А.А., Волков Е.А., Коздоба Л.А., Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А., Кувыркин Г.Н.

Моделирование распада переохлажденного аустенита можно проводить с применением термокинетических (ТКД) и изотермических диаграмм (ИТД). Проведенный сравнительный анализ свидетельствует, что наилучшего соответствия с экспериментом можно достичь при использовании теории изокинетических реакций, основанной на правиле аддитивности. Основой для расчета в этом случае является ИТД. Изотермический распад достаточно хорошо описывается уравнением Колмогорова-Джонсона-Мейла-Аврами. Вопросами моделирования фазово-структурных превращений при термообработке и сварке занимались Лошкарев В.Е., Самойлович Ю.А., Немзер Г.Г., Куркин А.С., Лешковцев В.Г., Покровский А.М., Адамова Н.А. и другие. Разработанный под руководством Куркина А.С. конечно-элементный программный комплекс «СВАРКА» позволяет рассчитывать температурно-структурные поля при сварке различных деталей.

Остаточные напряжения можно определять как расчетными, так и экспериментальными методами. Причем более перспективными являются расчетные методы, так как в отличие от экспериментальных не требуют наличия уникального дорогостоящего оборудования. Основным недостатком

опубликованных в настоящее время работ является решение задачи в упругопластической постановке, часто без учета нестационарности структурного состава. Большой вклад в развитие теории сварки и родственных процессов внес Николаев Г.А. В своих научных трудах он подробно изложил природу возникновения остаточных напряжений, разработал достаточно простые, но в то же время обладающие приемлемой точностью аналитические методы расчета остаточных напряжений. Развитием методик расчетного определения остаточных сварочных напряжений занимались Николаев Г.А., Винокуров В.А., Куркин С.А., Куркин А.С., Киселев А.С., Покровский А.М.

Проведенный литературный обзор методик оценки трещиностойкости и живучести термонагруженных в процессе изготовления деталей показывает, что для анализа трещиностойкости трубопроводов в зоне сварного стыкового соединения целесообразно использовать силовой критерий разрушения Ирвина. Причем в расчете необходимо вычислять суммарный КИН от действия остаточных сварочных напряжений и эксплуатационных напряжений от внутреннего давления. Для оценки живучести трубопроводов наиболее удобно применять формулу Пэриса, причем аналогично, как в расчетах на трещиностойкость, нужно подставлять в нее суммарный размах КИН. Основным недостатком опубликованных в настоящее время работ является пренебрежение при оценке трещиностойкости и живучести деталей технологическими остаточными напряжениями, которые как показывают исследования, могут превышать эксплуатационные напряжения. Вопросами вычисления КИН, оценки трещиностойкости и живучести деталей занимались Гриффитс А.А., Irwin J., Мураками А., Морозов Е.М., Черепанов Г.П., Махутов Н.А., Панасюк В.В., Дагдейл Д.С., Партон В.З., Матвиенко Ю.Г., Куркин А.С., Покровский А.М., Захаров М.Н.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию механических характеристик трубной стали 10Г2ФБ. Испытания проводились на оборудовании лаборатории кафедры «Прикладная механика» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Использовалась испытательная машина для растяжения образцов немецкой фирмы Zwick/Roell модель Z050, имеющая точность задания нагрузки 1 % и определения линейной деформации 1 мкм. Для проведения испытания была изготовлена партия стандартных образцов с цилиндрической рабочей частью.

В связи с тем, что ферритная и перлитная структуры имеют в основе  $\alpha$ -железо, они были объединены в одну феррито-перлитную структуру стали. В процессе испытания на пластичность и ползучесть феррито-перлитной структуры образцы нагревались до температуры аустенизации, а затем охлаждались до температуры испытания. При испытаниях на пластичность феррито-перлит исследовался при температурах 20, 450, 600 и 750 °С, а аустенит – при температурах 800, 900 и 1000 °С. Во всех опытах использовалось по три образца, результаты которых потом усреднялись. Доверительные интервалы рассчитывались согласно критерию Стьюдента. Уравнения состояния при пластичности для гетерогенной структуры в случае сложного напряженного состояния записываются следующим образом

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_T = (\sigma_{та} \cdot V_a + \sigma_{тф-п} \cdot V_{ф-п} + \sigma_{тб} \cdot V_b) / E,$$

$$\sigma_i = \sigma_{та} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{та}} \right)^{m_a} \cdot V_a + \sigma_{тф-п} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{тф-п}} \right)^{m_{ф-п}} \cdot V_{ф-п} + \sigma_{тб} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{тб}} \right)^{m_b} \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_T, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon = q_p + \sigma_i / E$  – силовая деформация;  $q_p = \int d\overline{\varepsilon}_i^p$  – параметр Удквиста при пластичности,  $\overline{d\varepsilon}_i^p$  – интенсивность приращений мгновенных пластических деформаций;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_{та}, \sigma_{тф-п}, \sigma_{тб}$  и  $m_a, m_{ф-п}, m_b$  – зависящие от температуры пределы текучести и показатели упрочнения для аустенита, феррита и бейнита соответственно,  $V_a, V_{ф-п}, V_b$  – удельные доли аустенита, феррито-перлита и бейнита соответственно. Для примера на Рис. 1 приведены кривые растяжения феррито-перлита с указанием доверительных интервалов.

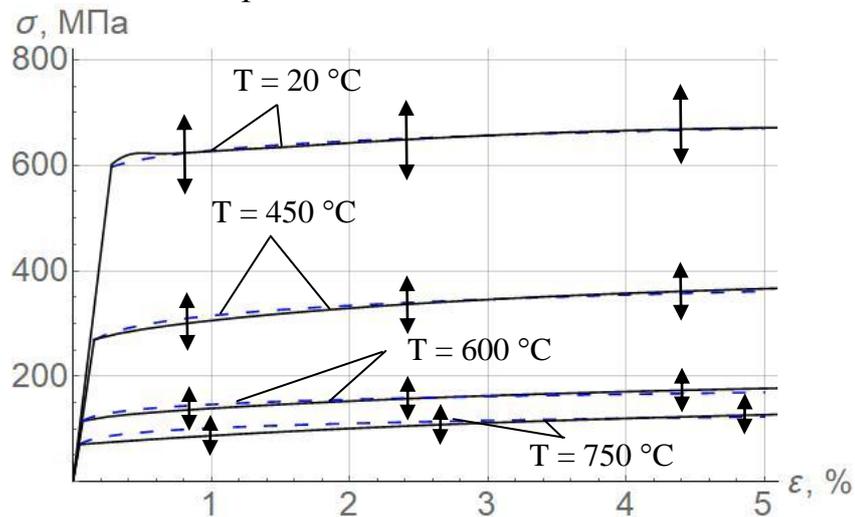


Рис. 1. Кривые растяжения феррито-перлита: эксперимент (сплошные линии), расчет (синие пунктирные линии)

Ползучесть стали 10Г2ФБ изучалась на том же оборудовании с использованием таких же цилиндрических образцов. Диапазон температур испытаний феррито-перлита составлял от 500 до 700 °С, аустенита от 800 до 1000 °С с шагом 100 °С. Кривые ползучести описывались в соответствии с теорией ползучести упрочнения

$$\xi_c = \gamma_a \sigma^{\nu_a} / (\varepsilon_c^a)^{\beta_a} V_a + \gamma_{ф-п} \sigma^{\nu_{ф-п}} / (\varepsilon_c^{ф-п})^{\beta_{ф-п}} V_{ф-п}, \quad (2)$$

где  $\gamma_a, \nu_a, \beta_a, \gamma_{ф-п}, \nu_{ф-п}, \beta_{ф-п}$  – зависящие от температуры эмпирические коэффициенты, описывающие кривые ползучести аустенита и феррито-перлита соответственно. В качестве иллюстрации на Рис. 2 приведены кривые ползучести феррито-перлита, полученные при температуре 500 °С. На рисунке отмечены доверительные интервалы.

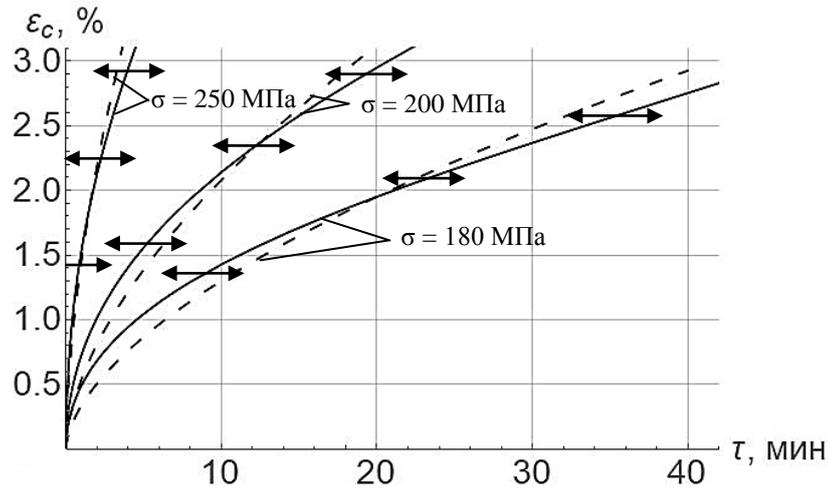


Рис. 2. Кривые ползучести феррито-перлита при  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ : эксперимент (сплошная линия), расчет (пунктирная линия)

Статистическая обработка опытных данных привела к следующим выражениям для эмпирических коэффициентов, входящих в уравнения состояния при пластичности и ползучести

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{та}} &= 279,9 - 0,251 \cdot t, & m_a &= -0,048 + 1,5 \cdot 10^{-4} t, \\
 \sigma_{\text{тф-п}} &= 608,1 - 0,757 \cdot t, & m_{\text{ф-п}} &= 0,037 - 1,03 \cdot 10^{-4} t, \\
 \lg \gamma_a &= -83,6 + 0,1564 \cdot t - 0,76 \cdot 10^{-4} t^2, & \beta_a &= -11,016 + 0,02634 \cdot t - 1,49 \cdot 10^{-5} t^2, \\
 \nu_a &= 59,05 - 0,1157 \cdot t + 0,59 \cdot 10^{-4} t^2, \\
 \lg \gamma_{\text{ф-п}} &= 172,242 - 0,679 \cdot t + 0,596 \cdot 10^{-3} t^2, & \beta_{\text{ф-п}} &= 1,969 - 0,25 \cdot 10^{-2} t, \\
 \nu_{\text{ф-п}} &= -103,7 + 0,387 \cdot t - 0,33 \cdot 10^{-3} t^2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

**В третьей главе** описана методика расчета остаточных напряжений. Для вычисления температурного поля в процессе сварки методом конечных разностей решается нелинейная нестационарная задача теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Принимается зависимость всех теплофизических коэффициентов от температуры и структурного состава. Моделирование фазового состава при переходе жидкой фазы в твердую в ходе кристаллизации производится на основании правила отрезков по диаграмме сплавов железо-углерод. Прогнозирование структурного состояния осуществляется на основании теории изокинетических реакций.

При решении задачи термоупруговязкопластичности в выражение приращения полной деформации кроме приращений упругой и пластической деформации вводится приращение деформации ползучести

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} \Delta \varepsilon_T = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_0, \tag{4}$$

где  $\Delta \varepsilon_{ij}^e$ ,  $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ ,  $\Delta \varepsilon_{ij}^c$  – приращение упругой, пластической деформации и деформации ползучести соответственно;  $\Delta \varepsilon_0$  – приращение дополнительной деформации;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta t$  – приращение свободной

деформации;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения, зависящий от температуры и структуры;  $\Delta t$  – изменение температуры на данном шаге по времени.

Решение задачи термоупруговязкопластичности осуществлено методом дополнительных деформаций, суть которого заключается в итерационном уточнении, посредством решения методом конечных элементов задачи термоупругости, приращения дополнительной деформации (4) до тех пор, пока интенсивность напряжений не оказывается на кривой растяжения (1).

Для вычисления скоростей деформации ползучести  $\xi_{ij}^c$ , которые пересчитывались в приращения деформаций ползучести на шаге по времени, использована теория ползучести с изотропным упрочнением. Для гетерогенной структуры скорость ползучести определена согласно

$$\xi_{ij}^c = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \left( \frac{\gamma_a \cdot \sigma_i^{\nu_a}}{(q_c^a)^{\beta_a}} \cdot V_A + \frac{\gamma_{\phi-п} \cdot \sigma_i^{\nu_{\phi-п}}}{(q_c^{\phi-п})^{\beta_{\phi-п}}} \cdot V_{\phi-п} \right). \quad (5)$$

$q_c^{a(\phi-п)} = \int d\bar{\varepsilon}_i^c$  – параметр Удквиста при ползучести аустенита (феррито-перлита),  $\overline{d\varepsilon_i^{c a(\phi-п)}}$  – интенсивность приращений деформаций ползучести аустенита (феррито-перлита),  $\gamma_a, \nu_a, \beta_a, \gamma_{\phi-п}, \nu_{\phi-п}, \beta_{\phi-п}$  – зависящие от температуры эмпирические коэффициенты, описывающие кривые ползучести аустенита и феррито-перлита соответственно. Приращение деформаций ползучести на шаге по времени  $\Delta \tau$  определены по формуле

$$\Delta \varepsilon_{ij}^c = \left( \xi_{ij}^c \right) \cdot \Delta \tau. \quad (6)$$

Алгоритм итерационного решения задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестационарной структурой на каждом шаге по времени заключается в следующем:

1. Решаются задачи теплопроводности и определения структур, и находятся приращения температуры и структурный состав, а по ним коэффициент линейного расширения в каждом конечном элементе.
2. Для данной температуры вычисляются параметры уравнений состояния при пластичности и ползучести (3) для каждого конечного элемента.
3. На первой итерации предполагается, что приращения мгновенной пластической деформации и деформации ползучести равны нулю.
4. Решается задача термоупругости и вычисляется интенсивность напряжений для каждого конечного элемента.
5. По кривой растяжения, зависящей от температуры и структуры, для данной интенсивности напряжений в конечном элементе определяется приращение пластической деформации, а по уравнению (6) приращение деформации ползучести.
6. Снова решается задача термоупругости с найденным значением приращения дополнительной деформации (4) в каждом конечном элементе.

7. Итерационный процесс заканчивается, когда интенсивность напряжений в каждом конечном элементе не превышает значения напряжения на кривой растяжения для данной накопленной пластической деформации.

Для верификации разработанных программных средств было осуществлено сравнение результатов расчета с данными, полученными экспериментально в открытых литературных источниках (Рис. 3).

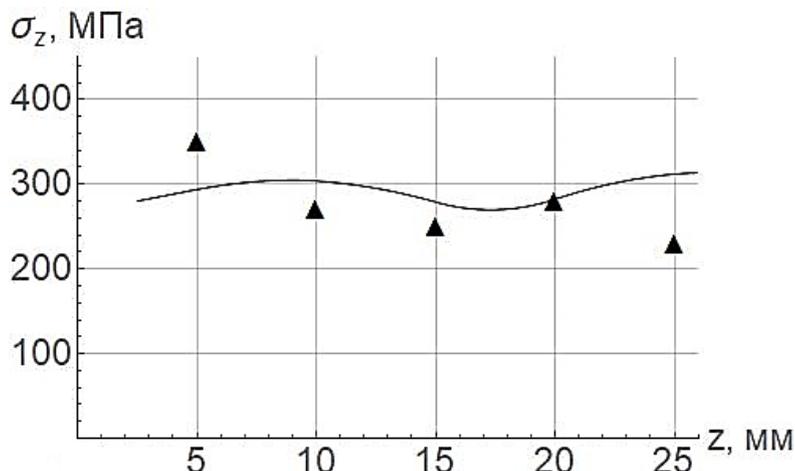


Рис. 3. Распределение по длине осевых остаточных сварочных напряжений на внутренней поверхности трубы: сплошная линия – расчет, маркеры – эксперимент

**В четвертой главе** проведен расчет температур, структур, остаточных напряжений, а также приведена оценка трещиностойкости и живучести на примере магистрального трубопровода «Сила Сибири», изготовленного из трубной стали класса прочности К60. На Рис. 4. представлено распределение температур в осевом направлении на внешней поверхности трубы для различных моментов времени после окончания сварки.

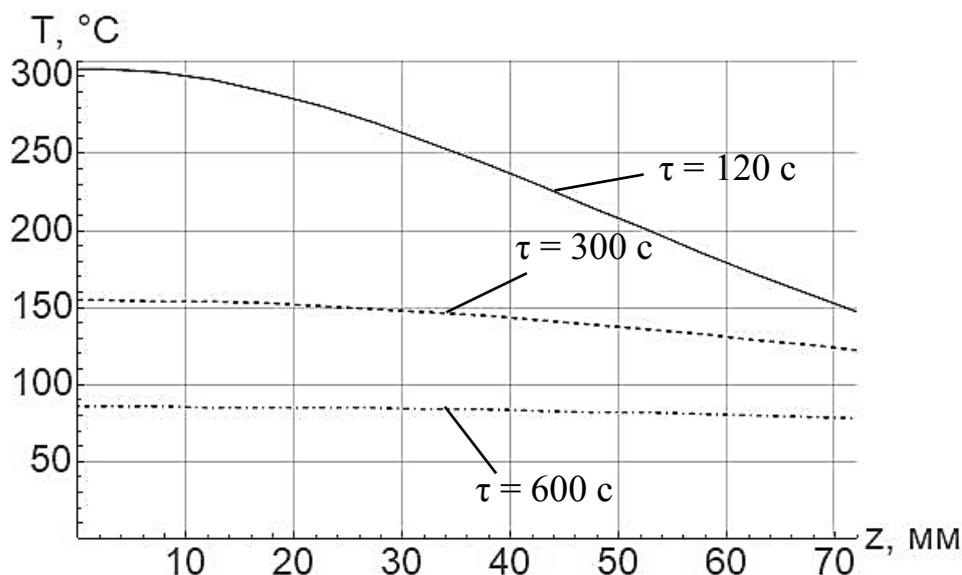


Рис. 4. Распределение температур по длине

На Рис. 5 представлены зависимости для объемных долей структур: феррито-перлит (1) и бейнит (2) в зоне сварного шва в зависимости от времени.

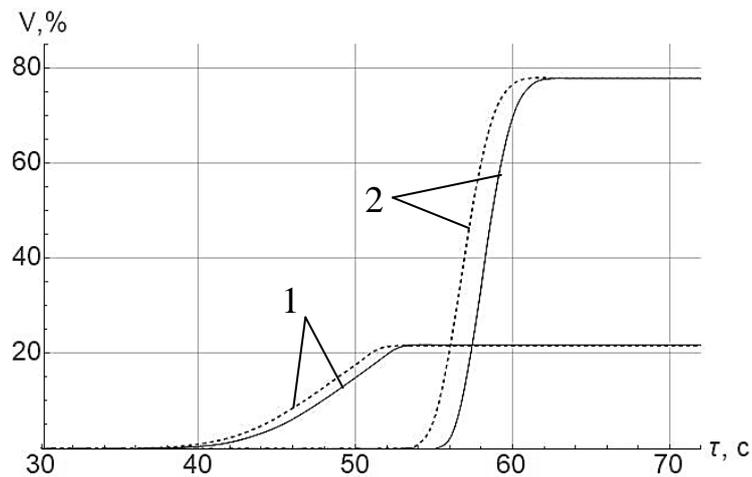


Рис. 5. Распределение удельных долей в окрестности сварного шва: поверхностный слой (штриховые линии), срединный слой (сплошные линии)

На Рис. 6 показано распределение остаточных осевых и окружных напряжений по длине трубы для упругопластического и вязкоупругопластического решений.

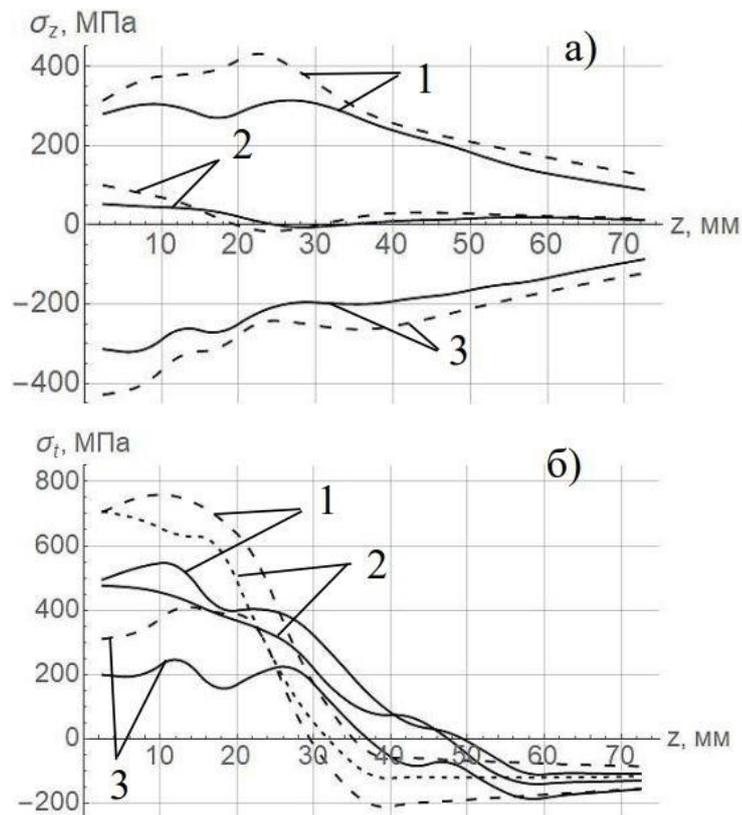


Рис. 6. Распределение осевых (а) и окружных (б) остаточных сварочных напряжений по длине трубы для: 1 – внутренней, 2 – срединной, 3 – внешней поверхностей для упруговязкопластического (сплошные линии) и упругопластического (штриховые линии) решения

Как видно из рисунка, максимальное превышение для осевых напряжений наблюдается на внутренней поверхности трубопровода на расстоянии 23 мм от центра сварного шва и составляет приблизительно 35%, что обосновывает

необходимость учета деформаций ползучести при расчете остаточных напряжений.

Для расчета КИН был разработан оригинальный метод расчета, основанный на методе сечений для случая полуэллиптической краевой трещины и верифицированный на основании сравнения с решениями, полученными по аппроксимационным формулам и в конечно-элементном комплексе Ansys. Расчет КИН производился по суммарным напряжениям, определяемым на основании принципа суперпозиции посредством сложения остаточных сварочных напряжений и эксплуатационных напряжений от рабочего давления в трубе.

Для оценки трещиностойкости пользовались силовым критерием разрушения Ирвина с учетом зависимости вязкости разрушения от структурного состава.

$$K_I^{\max} \leq K_{Ic}^{\text{ф-п}} V_{\text{ф-п}} + K_{Ic}^{\text{б}} (1 - V_{\text{ф-п}}), \quad (7)$$

где  $K_{Ic}^{\text{ф-п}}, K_{Ic}^{\text{б}}$  – вязкость разрушения феррито-перлита и бейнита соответственно.

Расчеты структурного состава показали, что структура трубы меняется лишь на расстоянии 17 мм от центра сварного шва, а далее представляет феррито-перлит. На Рис. 7 приведена зависимость вязкости разрушения гетерогенной структуры от расстояния до центра сварного шва.

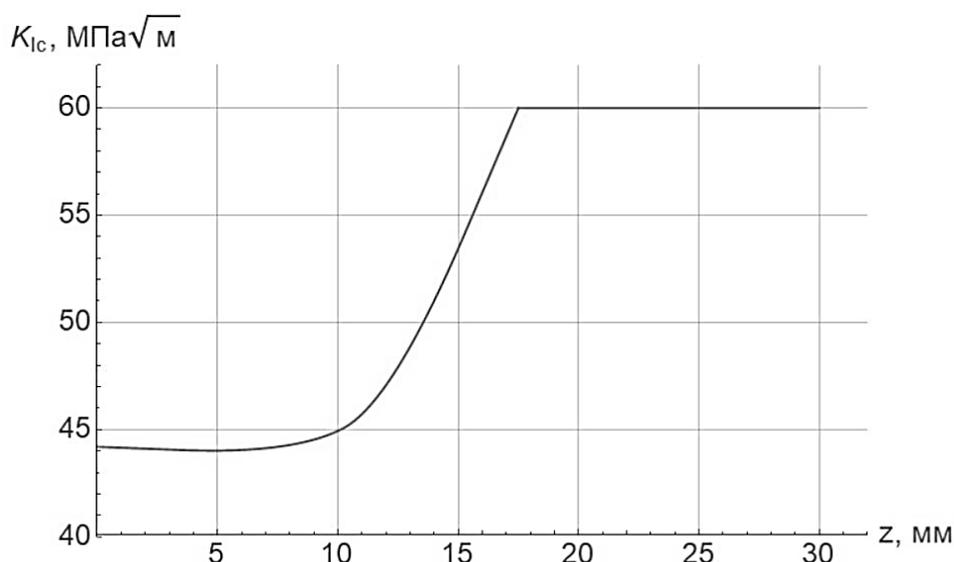


Рис. 7. Вязкость разрушения гетерогенной структуры

Значение  $K_I^{\max}$  определялось посредством анализа КИН в трех точках фронта трещины: в наиболее заглубленной точке и двух точках, выходящих на поверхность. Считалось, что условие разрушения выполнено, если КИН в одной из этих трех точек достигал критического значения. Результаты расчета для полуэллиптической продольной трещины, расположенной на внутренней стенке трубопровода в зоне действия максимальных суммарных окружных напряжений, приведены на Рис. 8.

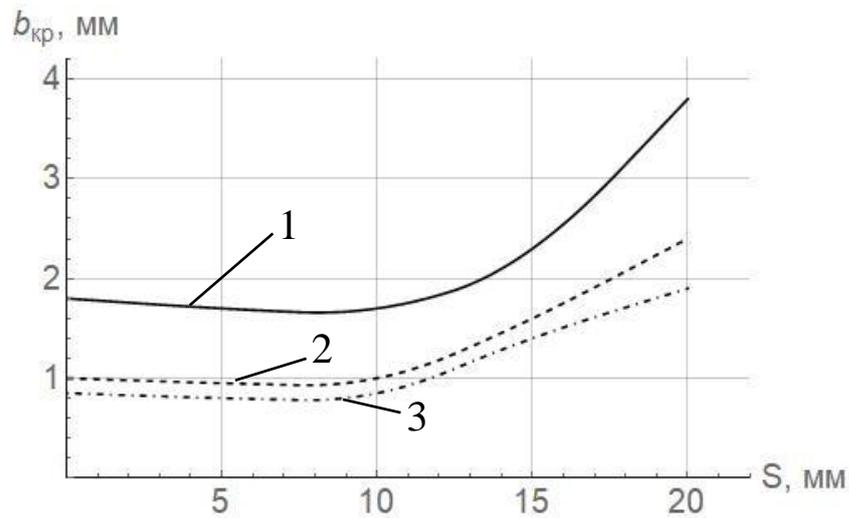


Рис. 8. Зависимость критической глубины от расстояния до центра сварного шва:  $a/b=1$  (1),  $a/b=3$  (2),  $a/b=5$  (3)

В основу расчета живучести трубопровода положена формула Пэриса для режима блочного нагружения.

$$l = \sum_i^6 \left( \int_0^{N_i} A (K_{\max} (1 - R_i))^m dN \right), \quad (8)$$

где  $N$  – число циклов нагружения,  $i$  – номер блока нагружения,  $A$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты,  $R$  – коэффициент асимметрии цикла. Варианты циклических нагрузок были приняты по данным из литературных источников.

В расчете на живучесть, как и в расчете на трещиностойкость, рассматривалась наиболее опасная продольная краевая полуэллиптическая трещина. На каждой итерации расчета проверялось выполнение условия Ирвина для двух точек: наиболее заглубленной и точки, выходящей на поверхность. На Рис. 9 представлены зависимости глубины и полудлины трещины, а на Рис. 10 – КИН от количества циклов нагружения для трещины с отношением начальной глубины к полудлине, равным 2.

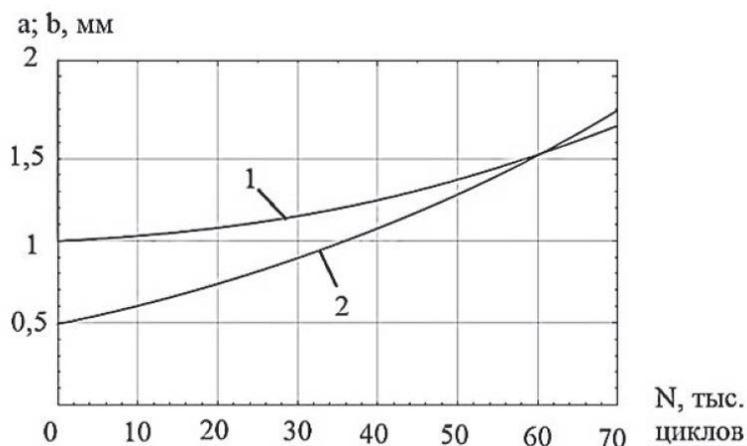


Рис. 9. Изменение глубины (1) и полудлины (2) для трещины с начальными размерами  $b_0 = 1$  мм,  $a_0 = 0,5$  мм

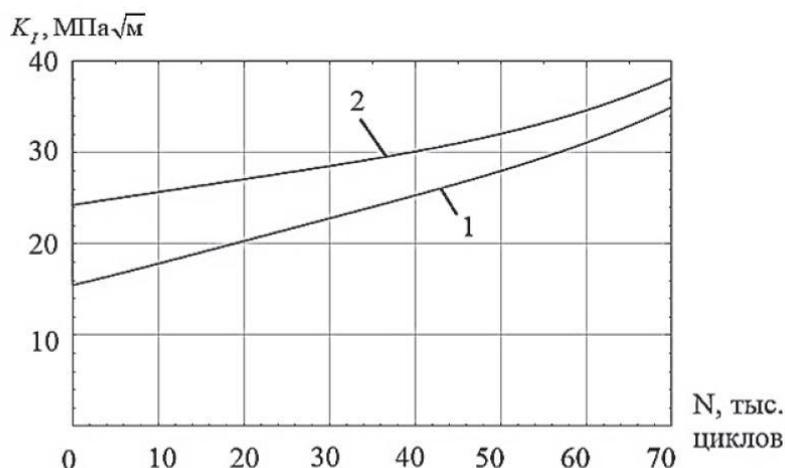


Рис. 10. Изменение КИН в наиболее заглубленной точке (1) и точке, выходящей на поверхность (2) для трещины с начальными размерами  $b_0 = 1$  мм,  $a_0 = 0,5$  мм

Из Рис. 9 видно, что трещина интенсивнее растет в длину, чем в глубину и при достижении 60 тыс. циклов полудлина трещины превышает глубину. Более интенсивный рост трещины в длину объясняется тем, что КИН в точке, выходящей на поверхность, превышает КИН в наиболее заглубленной точке на всем протяжении нагружения.

Результаты расчета ресурса для полуэллиптической продольной трещины, расположенной на внутренней стенке трубопровода в зоне действия максимальных остаточных напряжений приведены на Рис. 11.

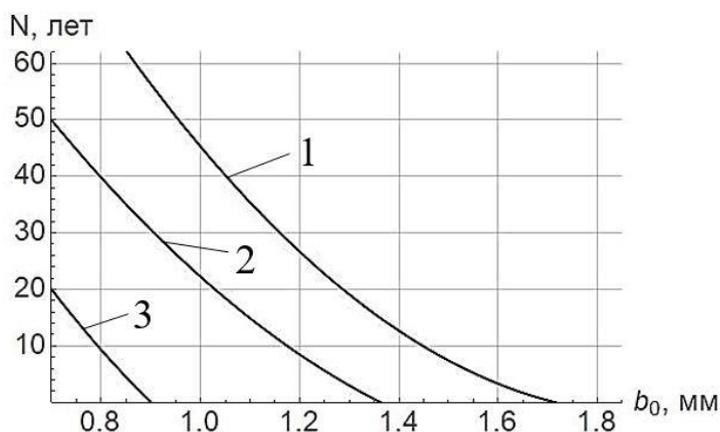


Рис. 11. Зависимость ресурса от начальной глубины трещины для соотношений полудлины и глубины:  $b/a=2$  (1),  $b/a=1$  (2),  $b/a=1/2$  (3)

Из Рис. 11 видно, что трещина становится более опасной с уменьшением соотношения глубины к полудлине.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика решения задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестационарной структурой применительно к сварке встык элементов трубопровода. Проведена верификация созданных по указанной методике программных средств.

2. Проведено испытание по изучению пластичности трубной стали класса прочности К60. Получены мгновенные кривые растяжения аустенита и феррито-перлита. Проведена статистическая обработка опытных данных, в ходе которой получены доверительные интервалы. Установлено, что кривые растяжения хорошо описываются с использованием модели упругопластической среды со степенным упрочнением. Получены уравнения состояния при пластичности для материала с нестационарной структурой.

3. Осуществлено экспериментальное исследование ползучести высокотемпературных структур аустенита и феррито-перлита трубной стали класса прочности К60. Получены кривые ползучести, установлены в процессе статистической обработки доверительные интервалы. Выяснено, что кривые ползучести хорошо описываются по теории ползучести с изотропным упрочнением. Получены уравнения состояния при ползучести для материала с нестационарной структурой.

4. Разработан достаточно простой, но в тоже время обладающий приемлемой точностью численный метод вычисления КИН для полуэллиптической продольной трещины в нагруженной внутренним давлением трубе. Указанный метод может быть использован не только для оценки трещиностойкости и живучести магистральных трубопроводов, но и других оболочечных элементов конструкций с краевыми трещинами.

5. Созданы методики и программные средства для анализа трещиностойкости и живучести трубопроводов с учетом остаточных сварочных напряжений в зоне стыкового сварного соединения. Указанные методики позволяют после проведения планового ультразвукового исследования трубопровода сделать вывод о целесообразности замены дефектного участка, тем самым устранив возможность аварийной ситуации.

6. Представлены результаты расчета остаточных сварочных напряжений, трещиностойкости и живучести для реального магистрального газопровода «Сила Сибири». Расчетные данные по оценке трещиностойкости приведены в виде зависимостей критической глубины трещины от расстояния до середины сварного шва и отношения полудлины трещины к глубине. Результаты расчета на живучесть представлены в виде зависимостей ресурса газопровода в годах от начальной глубины трещины и отношения полудлины к глубине.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Покровский А.М., Авагимов С.С., Дубовицкий Е.И. Расчет эксплуатационных напряжений в магистральном нефтепроводе с учетом остаточных сварочных напряжений // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 9. С. 123-137. (1,75 п.л./1 п.л.)
2. Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Оценка трещиностойкости магистрального нефтепровода с учетом остаточных сварочных напряжений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 7(688). С. 10-19. (1,25 п.л./0,7 п.л.)

3. Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Применение метода сечений для определения коэффициента интенсивности напряжений по фронту полуэллиптической поперечной краевой трещины в растянутой полосе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 3(87). С. 1-14. (1,75 п.л./0,8 п.л.)
4. Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Анализ живучести магистрального нефтепровода в зоне стыкового сварного соединения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 4(112). С. 1-17. (2,12 п.л./1,5 п.л.)
5. Makhutov N.A., Pokrovskii A.M., Dubovitskii E.I. Analysis of Crack Resistance of an Oil Trunk Pipeline Considering the Varying Failure Viscosity in the Neighborhood of a Welded Joint // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No 1. P. 35-42. (0,87 п.л./0,4 п.л.)
6. Pokrovskiy A.M., Chermoshentseva A.S., Dubovitskiy E.I. Temperature and structure numerical analysis in the overlaying of a bimetallic roll // AIP Conference Proceedings : International Scientific and Practical Conference "Modeling in Education 2019", Moscow, 19–21 июня 2019 года. Moscow: American Institute of Physics Inc. 2019. Vol. 2195. Art.no 020014, 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5140114>. (0,56 п.л./0,15 п.л.)
7. Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Анализ трещиностойкости трубопровода в зоне сварного соединения // Механика и математическое моделирование в технике: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции, посвященной юбилеям основателей кафедры "Прикладная механика" МГТУ им. Н.Э. Баумана профессоров С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого. Москва. 2017. С. 336-341. (0,25 п.л./0,12 п.л.)
8. Дубовицкий Е.И., Покровский А.М. Методика оценки трещиностойкости магистрального нефтепровода в зоне сварного соединения // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018): Сборник трудов международной конференции. Москва. 2019. С. 90-93. (0,25 п.л./0,1 п.л.)
9. Покровский А.М., Чермошенцева А.С., Дубовицкий Е.И. Расчет КИН по фронту полуэллиптической поперечной трещины в растянутой полосе // III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций: Сборник трудов международной конференции. Улан-Удэ. 2019. С. 209-215. (0,25 п.л./0,07 п.л.)
10. Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Анализ живучести магистрального нефтепровода в окрестности сварного шва // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2020): Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. Москва. 2020. С. 99-102. (0,25 п.л./0,15 п.л.)