

АНАЛИЗ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА*

Д-р техн. наук, проф. Р. К. ВАФИН, асп. А. М. ПОКРОВСКИЙ

Разработана методика оценки прочности магистральных трубопроводов при эксплуатации в зоне стыкового сварного соединения с учётом остаточных сварочных напряжений. Представлены результаты численного анализа трещиностойкости трубопровода при различном рабочем давлении. Предлагаемая методика может быть применена для анализа трещиностойкости и других сварных деталей.

This article presents the methods of pipeline risk evaluation at the maintenance in a zone of butt welded connection with the account of residual welding current. Results are presented for the numerical analysis of crack-propagation resistance in the pipes of the pipeline with a rated working pressure. This part of the analysis of crack-propagation resistance can be also applied to other welded materials.

Актуальной проблемой при эксплуатации трубопроводных систем, определяющей их безопасность, является оценка их трещиностойкости. Сказанное особенно важно для объектов, представляющих повышенную техногенную опасность, таких, как нефтегазовые трубопроводы, теплообменники ядерных реакторов. Практика эксплуатации трубопроводных систем показывает, что наиболее часто разрушение труб происходит вдоль образующей в окрестности поперечного сварного шва. Необходимо отметить, что трубы большого диаметра изготавливаются сварными: прямошовными или спиральными. Однако наибольшую опасность представляют именно поперечные швы, произведенные по месту, без использования специального оборудования, используемого на трубопрокатных заводах, и без последующей релаксационной термической обработки. Нами разработана методика расчета на трещиностойкость стыкового сварного соединения трубопроводных систем в процессе эксплуатации с учетом, что особенно ценно, остаточных сварочных напряжений.

Для оценки трещиностойкости трубопроводов необходимо знать распределение в них суммарных напряжений от сварки и рабочего внутреннего давления. В связи с тем, что при эксплуатации трубопроводных систем обычно происходит только их упругое деформирование, имеется возможность отдельно решать две задачи: задачу определения остаточных сварочных напряжений и задачу расчета эксплуатационных напряжений. Для тонкостенных труб последние с достаточной степенью точности определяются по вытекающим из уравнения Лапласа «котельным» формулам. Суммарные напряжения в трубах можно получить на основании принципа суперпозиции путем сложения остаточных и рабочих напряжений.

Для вычисления остаточных сварочных напряжений была разработана математическая модель термомеханических процессов, протекающих при сварке встык двух стальных труб с учетом, что особенно ценно, нестабильности структуры стали. Нестабильность обусловлена тем, что при сварке в стали протекают структурные превращения.

В связи с тем, что в начальной стадии процесса сварки при повышенных температурах в значительной степени проявляются реономные свойства стали, а в конце — преобладает пластическое деформирование металла, в основу расчета сварочных напряжений положено решение физически нелинейной задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестабильной структурой. Применен шаговый метод расчета, при котором

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00141 а).

на каждом шаге по времени последовательно решается три задачи. Сначала методом конечных разностей решается задача нелинейной нестационарной теплопроводности и определяется температурное поле по сечению трубы. Затем по температурным значениям рассчитывается структурный состав и коэффициент линейного расширения в каждом конечном элементе. И, наконец, собственно рассчитываются напряжения.

Для решения физически нелинейной задачи термоупруговязкопластичности применялся шаговый метод дополнительных (начальных) деформаций [1], основанный на теориях пластичности течения и ползучести упрочнения, распространенным на случай неустойчивого структурного состава [2]. Согласно данному методу решение задачи термоупруговязкопластичности сводится к последовательному решению МКЭ задачи термоупругости. Расчет ведется в приращениях, при этом приращение деформаций на каждом шаге по времени имеет вид

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^o, \quad (1)$$

где $\Delta \varepsilon_{ij}^o = \Delta \varepsilon_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} \Delta \varepsilon_T$ — дополнительная деформация; $\Delta \varepsilon_{ij}^e, \Delta \varepsilon_{ij}^p, \Delta \varepsilon_{ij}^c$ — приращения компонентов упругой, пластической деформации и деформации ползучести соответственно; $\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta t$ — приращение свободной деформации; α — суммарный коэффициент линейного расширения, учитывающий температурные и структурные изменения объема; δ_{ij} — символ Кронекера. Величина $\Delta \varepsilon_T$ остается постоянной на шаге, а $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ и $\Delta \varepsilon_{ij}^c$ итерационно уточняются. Подробно методика решения связанной задачи термоупруговязкопластичности представлена в [2], а подход к расчету сварочных напряжений в трубах с использованием данной методики — в [3].

В качестве примера численной реализации рассчитаны сварочные напряжения в магистральном трубопроводе — из стали 17ГС (диаметр 530 мм, толщина стенки 8 мм). Ширина сварочного шва при электродуговой сварке встык принималась равной 15 мм, толщина шва равной толщине трубы. При решении задачи теплопроводности принималось, что начальная температура сварочной ванны 2000°С (средняя температура нагрева при электродуговой сварке), начальная температура трубы вне зоны шва 20°С. Зависящие от температуры и структуры теплофизические коэффициенты задавались такими же, как в [2].

Расчет структурного состояния трубы после сварки показал, что мартенсит при охлаждении трубы не формируется, структура сварного шва и околошовной зоны представляет собой 11% феррито-перлитной смеси и 89% бейнита. На расстоянии около двух толщин от осевой линии шва структура становится чисто перлитной, так как труба до температуры аустенизации не нагревается и структурных превращений поэтому не происходит.

На начальном этапе охлаждения после сварки температура сварного шва превосходит температуру кристаллизации (1500 °С) и сталь находится в жидком состоянии. Для описания этой расплавленной зоны металла применялись так называемые фиктивные конечные элементы, обладающие бесконечно малой жесткостью (модуль Юнга — 1 Па) и поэтому фактически не оказывающие никакого сопротивления деформированию. Коэффициент Пуассона в них задавался равным 0,499, как для практически несжимаемой жидкости. Использовать точное значение коэффициента Пуассона, равное 0,5 для абсолютно несжимаемого тела, не представлялось возможным вследствие возникающей в этом случае неопределенности матрицы упругих характеристик в МКЭ.

На рис. 1 и 2 представлено распределение остаточных осевых и окружных напряжений в продольном сечении трубы после электродуговой сварки. В силу симметрии задачи относительно срединного сечения показана только правая верхняя часть трубы. Причем

для удобства восприятия рисунка масштаб по толщине трубы выбран в три раза большим, чем по длине. На удалении от сварного шва напряжения затухают, поэтому представлено распределение напряжений только на части трубы длиной 60 мм.

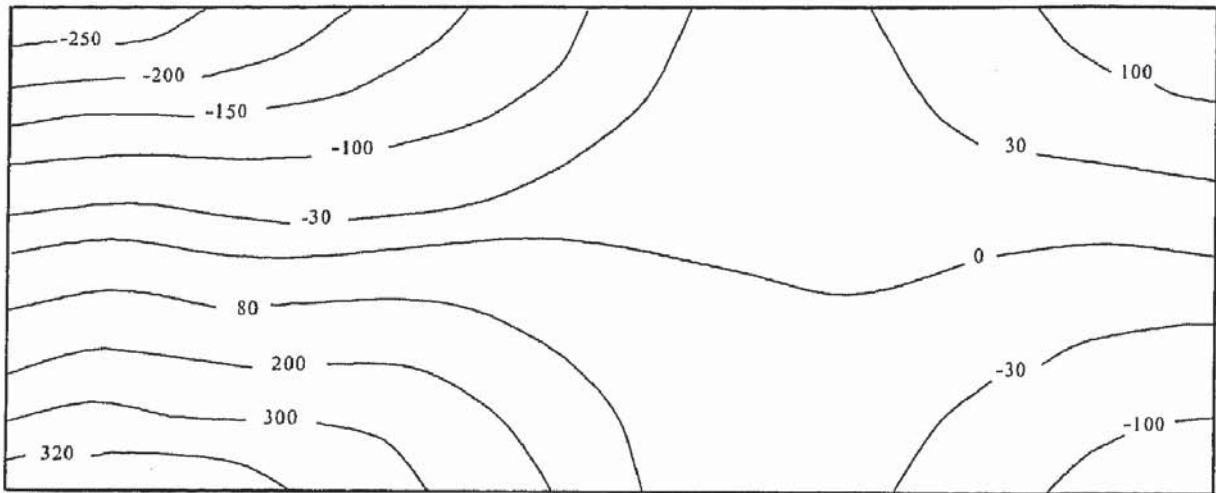


Рис. 1. Распределение остаточных сварочных осевых напряжений в продольном сечении трубы

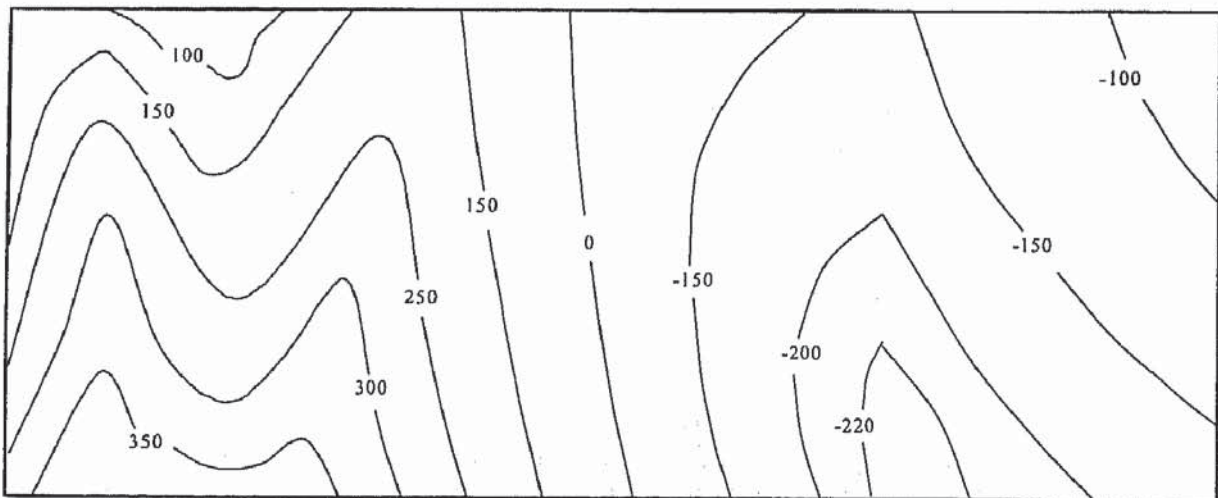


Рис. 2. Распределение остаточных сварочных окружных напряжений в продольном сечении трубы

Из рис. 1 видно, что картина изолиний осевых напряжений практически симметрична относительно срединной поверхности трубы. В зоне сварного шва напряжения сжимающие на внутренней поверхности трубы и растягивающие на внешней. Причем максимальны как растягивающие напряжения, достигающие 320 МПа, так и сжимающие, равные 250 МПа. Возникают они в окрестности осевой линии сварного шва. Смена знака как растягивающих, так и сжимающих напряжений происходит на расстоянии, приблизительно равном пяти толщинам трубы от осевой линии шва. Окружные напряжения в зоне сварного шва (рис. 2) — растягивающие по всей толщине трубы и становятся сжимающими на расстоянии около трех толщин от осевой линии. Зона максимальных растягивающих напряжений, достигающих 350 МПа, располагается в сварном шве на внутренней поверхности трубы.

Анализ трещиностойкости стыкового сварного соединения трубопровода проведен для наиболее опасного случая, когда краевая продольная трещина располагается на

внутренней поверхности трубы в зоне сварного шва. Предполагалось, что форма трещин полуэллиптическая, вытянутая вдоль образующей трубы. Рассматривались разные отношения полуосей, в том числе и равное единице, при котором получалась полукруговая трещина. В связи с тем, что диаметр рассматриваемой трубы более чем в 50 раз превышает толщину стенки, имеется возможность с достаточной степенью точности вести расчет КИН по формулам для эллиптических поперечных трещин в бесконечной полосе. Толщина полосы при этом должна совпадать по толщине с трубой, а растягивающее напряжение равняться суммарному окружному напряжению в трубе от сварки и давления. Аппроксимационная формула для определения КИН в наиболее углубленной точке фронта трещины имеет вид [4]

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi b} (1,1362 - 0,3927\varepsilon - 0,3454\varepsilon^2 + 0,2623\varepsilon^3 + \\ + \lambda(-0,2179 + 0,2354\varepsilon + 0,3773\varepsilon^2 - 0,4189\varepsilon^3) + \\ + \lambda^2(5,0486 - 16,7939\varepsilon + 19,9861\varepsilon^2 - 8,0212\varepsilon^3) + \\ + \lambda^3(-2,6383 + 8,6007\varepsilon - 9,6332\varepsilon^2 + 3,5118\varepsilon^3)), \quad (2)$$

где $0,125 \leq \varepsilon = b/a$, $\lambda = b/t \leq 0,6$; a, b — большая и меньшая полуоси эллипса; t — толщина полосы; σ — напряжение, растягивающее полосу.

Критический размер трещины можно определить на основании силового критерия Ирвина [5], зная зависимость коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от размера трещины

$$K_{1\max} \leq K_{lc}, \quad (3)$$

где $K_{1\max}$ — максимальное значение КИН по фронту трещины, K_{lc} — вязкость разрушения, которую для гетерогенной структуры можно определить на основании правила смеси

$$K_{lc} = K_{lc}^{\text{П}} V_{\text{П}} + K_{lc}^{\text{Б}} V_{\text{Б}}, \quad (4)$$

здесь, согласно данным [6], $K_{lc}^{\text{П}} = 50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и $K_{lc}^{\text{Б}} = 40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ — вязкость разрушения феррито-перлитной и бейнитной структуры; $V_{\text{П,Б}}$ — удельные доли феррито-перлитной смеси и бейнита соответственно.

Следует отметить, что максимальный КИН возникает в наиболее углубленной точке фронта только для вытянутой полуэллиптической трещины, а для полукруговой — в точке, выходящей на поверхность. Значение КИН в этой точке можно определить по следующей аппроксимационной формуле [7]:

$$K_1 = K_0 (1,278 - 1,064\lambda + 3,088\lambda^2 - 1,833\lambda^3), \quad (5)$$

где $\lambda = b/t$; $K_0 = 2\sigma \sqrt{b/\pi}$ — КИН для круговой трещины в бесконечной среде; b — радиус трещины; t — толщина полосы.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены результаты анализа трещиностойкости сварного стыкового соединения в виде зависимостей критической глубины трещины от отношения глубины дефекта к его длине для различных давлений. Отметим, что внутреннее давление в трубе равно 7,5 МПа является рабочим давлением в магистральных трубопроводах [6]. Для получения представленных графиков по формулам (4),(5) итерационно определялись значения b , удовлетворяющие критерию Ирвина (3). Необходимость в итерациях возникала вследствие невозможности выразить формулы (4),(5) в явном виде относительно b . Из рисунка видно, что более опасными являются вытянутые дефекты.

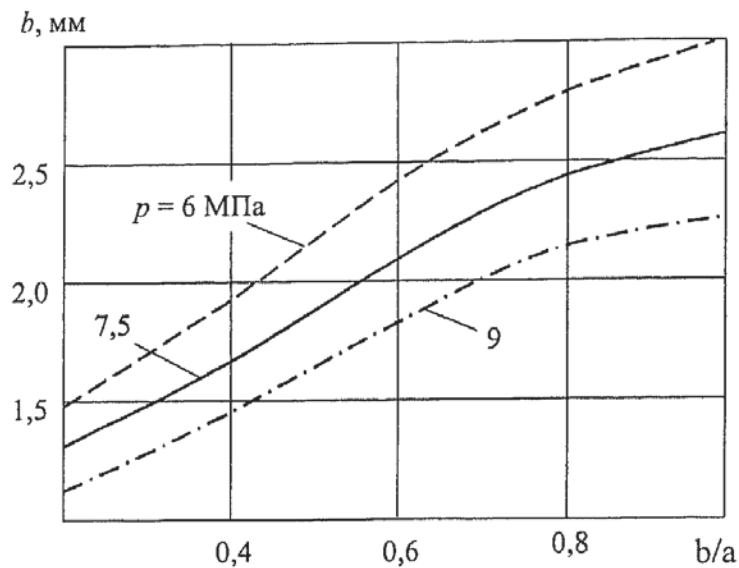


Рис. 3. Зависимости критической глубины трещины от отношения глубины дефекта к его длине для различных давлений в трубе

Выводы

1. Наибольшую опасность для трубопроводов представляют вытянутые вдоль образующей продольные дефекты, расположенные на внутренней поверхности трубы в зоне сварного шва.

2. Оценка трещиностойкости сварных трубопроводов без учета остаточных сварочных напряжений недопустима, так как эти напряжения соизмеримы с эксплуатационными напряжениями, а в некоторых случаях превосходят их.

3. Предлагаемый подход к анализу трещиностойкости сварных трубопроводов позволяет, после проведения планового ультразвукового контроля, сделать вывод о своевременной замене трубы с трещиной недопустимых размеров, обеспечивая тем самым безопасность работы трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термопрочность деталей машин / Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. — М.: Машиностроение, 1975. — 456 с.
2. Вафин Р.К., Покровский А.М., Лешковцев В.Г. Прочность термообрабатываемых прокатных валков. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 264 с.
3. Расчет сварочных остаточных напряжений при электродуговой сварке труб / Г.Я. Пановко, О.С. Нарайкин, А.М. Покровский, О.А. Волоховская // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2005. — № 3. — С. 39—45.
4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / Под ред. В.В.Панасюка. — К.: Наукова думка, 1988. — Т. 2. — 670 с.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 416 с.
6. Захаров М.Н., Лукьянов В.А. Прочность сосудов и трубопроводов с дефектами стенок в нефтегазовых производствах. — М.: ГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2000. — 216 с.
7. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — Т. 2. — 1016 с.