

Расчет и конструирование машин

УДК 622.692.4.0.1: 593.4

Анализ влияния дефектов в зоне сварного шва на прочность трубопровода

**И.Н. Андронов, С.С. Гаврюшин,
Д.В. Захаренков, А.И. Пронин**

В работе излагаются результаты численного исследования комплексного влияния макро погрешностей и локальных дефектов, расположенных в зоне сварного шва, на прочность магистрального трубопровода. Показано, что влияние дефектов монтажа, оказывающееся незначительным на достаточном удалении от стыков, должно быть учтено при анализе напряженно-деформированного состояния в зоне сварного стыка и оценке влияния на прочность трещиноподобных дефектов. С использованием метода подконструкций численно промоделирован процесс роста трещины в районе сварного шва с учетом упругопластического деформирования материала.

Ключевые слова: дефекты монтажа, метод конечных элементов, метод подконструкций, прочность, сварной шов, трубопровод, трещина, упругопластическое деформирование, численное моделирование.

The results of numerical analysis of complex influence of installation errors and local defects located in a zone of a welded seam, on durability of the main pipeline are stated. It is shown, that the influence of defects of installation appearing insignificant on sufficient distance from joints, should be taken into

АНДРОНОВ

Иван Николаевич
доктор технических наук,
профессор,
проректор по научной
работе
(Ухтинский
государственный
технический университет)

ГАВРЮШИН

Сергей Сергеевич
доктор технических наук,
зав. кафедрой
«Компьютерные системы
автоматизации
производства»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ЗАХАРЕНКОВ

Дмитрий Викторович
студент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ПРОНИН

Алексей Иванович
заместитель начальника
службы по экспертизе
проектов и смет ООО
«Газпром трансгаз» (Ухта)

account at the stress state analysis in the zone of a welded joint and estimation of the cracks influence on durability. With using of substructures method numerically simulated the growth of a crack process in the welded seam area in view of elasticplastic deforming of a material.

Keywords: Defects of installation, the finite elements method, the method of substructures, durability, welded seam, pipeline, crack, nonlinear deforming, numerical simulation.

Введение

По существующим нормативным документам запас прочности трубопроводов, нагруженных внутренним давлением, определяется исходя из предположения об однородном распределении напряжений по периметру и длине трубы [1, 2]. Вместе с тем в практике эксплуатации трубопроводных систем зафиксированы многочисленные случаи разрушения трубопроводов при рабочих давлениях ниже допускаемых. Причиной тому служит наличие в трубопроводе макро- и микронеоднородностей геометрии и структуры металла, которые необходимо учитывать при прочностных расчетах.

Макродефекты геометрии трубопровода совместно с локальными дефектами в виде трещин, пор, включений, играющих роль концентраторов напряжений (рис. 1), изменяют картину распределения напряжений в зонах сварных стыков трубопровода и, как правило, снижают его прочность в целом.

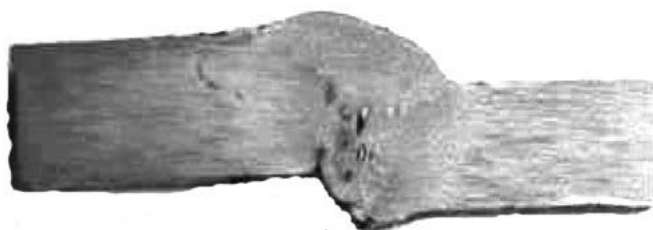


Рис. 1. Макро- и микродефекты в зоне сварного шва

Традиционное суждение о возможности превращения начального дефекта в растущую трещину основывается на асимптотическом решении плоской задачи теории упругости для перфорированного разреза. Такой подход

позволяет вычислить коэффициенты интенсивности напряжений и сформулировать тот или иной критерий разрушения, определяющий условие наступления предельного состояния равновесия [3, 4, 5]. Более совершенные математические модели позволяют произвести расчет с учетом развития упругопластических деформаций в районе вершины трещины [6, 7].

Вместе с тем напряженное состояние в реальных конструкциях, к каковым следует отнести трубопроводы, обладает спецификой, связанной как с макрогеометрическими параметрами зоны стыка, так и с качеством сварного шва, и отличается от плоского напряженного состояния. Поскольку трещины, поры, включения и другие локальные дефекты, как правило, представляют собой пространственные объекты, различным образом ориентированные в объеме материала трубопровода, использование для анализа предположения о плоском напряженном состоянии не всегда применимо и может стать причиной существенных погрешностей расчета.

Современные методики и алгоритмы численного анализа, прежде всего метода конечных элементов [8, 9, 10, 11], позволяют исследовать проблему с учетом вышеизложенных специфических особенностей.

Методика исследования

При исследованиях численно моделировалась зона сварного стыка магистрального трубопровода, включающая два участка длиной 400 мм каждый. Размеры труб принимались равными 530×8 мм (ТУ 14-3Р-1471-2002). Анализ проводился в среде конечно-элементного программного комплекса «ANSYS» [12, 13].

При расчетах учитывались возможные макроразрушения однородности геометрии трубопровода в месте стыка. При относительно большом диаметре и тонких по сравнению с ним стенках трубы существует вероятность возникновения погрешностей монтажа (рис. 2), которые рационально охарактеризовать величинами несоосности δ и угловой погрешности γ .

Для анализа НДС была построена параметрическая модель трубопровода, насчитываю-

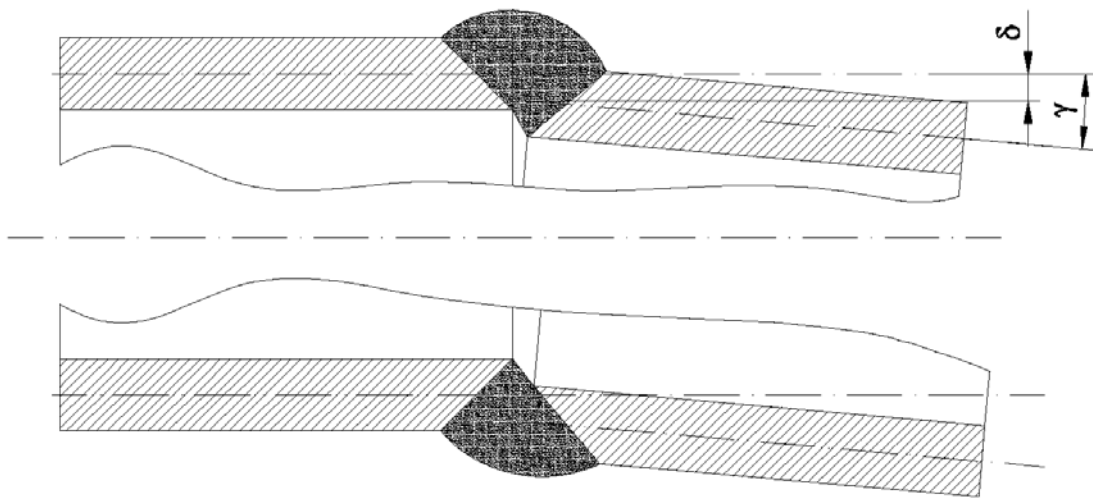


Рис. 2. Погрешности монтажа в зоне сварного стыка трубопровода

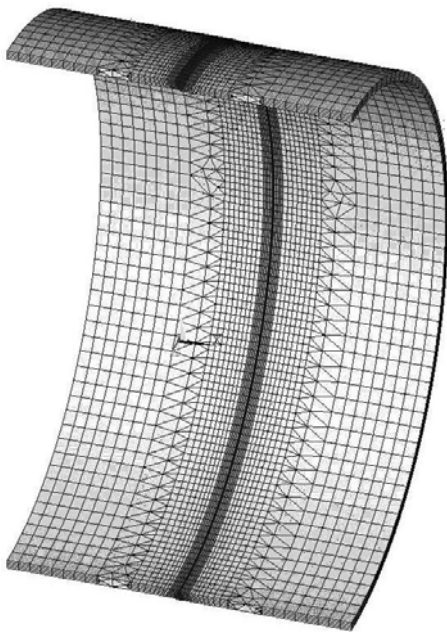


Рис. 3. Конечно-элементная аппроксимация участка трубопровода

щая около 30 тыс. изопараметрических пространственных конечных элементов (рис. 3). В силу симметрии рассматривалась половина конструкции.

Конечно-элементная модель соединения включала в себя сварной шов, образующийся в результате кристаллизации сварочной ванны, зону сплавления и зону термического влияния [14, 15]. Остаточные напряжения в шве предполагались пренебрежимо малыми. Размеры для моделирования зоны сварного шва выбирались в соответствии с ГОСТ 5264—80 [14]. В зонах предполагаемой концентрации напря-

жений сетка сгущалась. Труба нагружалась внутренним давлением, величина которого изменялась от 0 до 10 МПа. В качестве граничных условий использовались условия симметрии вдоль меридиональных кромок трубы. На перемещения узлов, принадлежащих окружным кромкам, вводились ограничения на осевые перемещения.

При анализе использовалась билинейная упругопластическая модель материала с изотропным упрочнением [7]. Механические характеристики основного металла (сталь 17Г1С), металла в зоне сварного шва и в околошовной зоне [16] брались в усредненном виде (табл. 1).

Таблица 1

Механические характеристики материалов

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль на участке упрочнения, МПа	Предел текучести, МПа
Основной материал трубы	$2,06 \times 10^5$	0,3	$2,7 \times 10^3$	260
Материал шва	$2,06 \times 10^5$	0,3	$2,7 \times 10^3$	400
Материал околошовной зоны	$2,06 \times 10^5$	0,3	$2,7 \times 10^3$	240

На *первом этапе* численно анализировалось влияние погрешностей монтажа на НДС трубопровода при нагружении его внутренним давлением заданной интенсивности. Задача решалась в геометрически и физически линейной постановке. В двойном цикле по параметрам

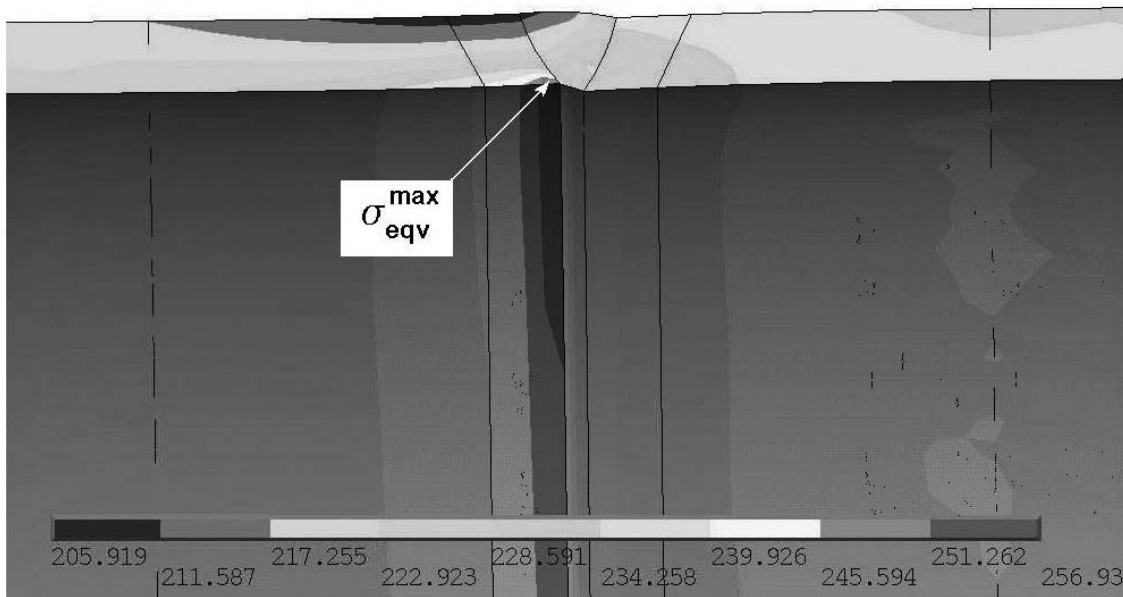


Рис. 4. Примерная цветографическая диаграмма распределения эквивалентных напряжений в зоне сварного шва ($\delta = 2$ мм, $\gamma = 24'$)

δ и γ был проведен многовариантный расчет сварного соединения с вычислением максимального значения эквивалентного напряжения по энергетической теории прочности [17] для каждого варианта. При оценке влияния макронесовершенств сопоставлялись максимальные эквивалентные напряжения, рассчитанные для несовершенного и идеального ($\delta = 0$, $\gamma = 0$) стыков. Результаты исследования позволили сделать вывод, что влияние макрогеометрических несовершенств сварного шва при существующих технологических допусках на δ и γ даже при самом неблагоприятном сочетании δ и γ не превышает 5%. Вместе с тем картина НДС в зонах сварного шва получает весьма существенные искажения (рис. 4), которые следует учитывать при дальнейшем анализе.

На *втором этапе* исследовался процесс деформирования в локальной зоне сварного шва, ослабленного трещиной. Анализировалась подконструкция (рис. 5, рис. 6), представляющая собой детализированную конечно-элементную модель локальной зоны, ослабленной трещиной.

Построение дефекта проводилось с помощью специальной подпрограммы, составленной на языке ADPL, посредством исключения из детализированной конечно-элементной модели подконструкции конечных эле-

ментов, расположенных в занимаемом дефектом объеме.

В соответствии с методикой расчета подконструкций кинематические граничные условия с базовой модели переносились на границы подконструкции. Далее в предположении, что кинематические условия на границах подконструкции остаются неизменными, производился цикл расчетов, в рамках которых анализировалось поведение трещины и определялось критическое давление для рассматриваемой конструкции.

Исследовались два основных варианта ориентации трещины в меридиональном и окружном направлениях. Длина трещины варьировалась в пределах от 5 до 40 мм. Задача нелинейного деформирования решалась методом продолжения решения по параметру давления. На каждом шаге по параметру давления учитывалась возникающая в процессе роста давления диверсификация элементов по критерию разрушения. В качестве критерия наступления разрушения использовался деформационный критерий разрушения [18].

Критическая величина интенсивности пластических деформаций ϵ_{cr}^p считалась известной и не зависящей от вида напряженного состояния. При превышении величиной интенсивности деформаций предельного значения конеч-

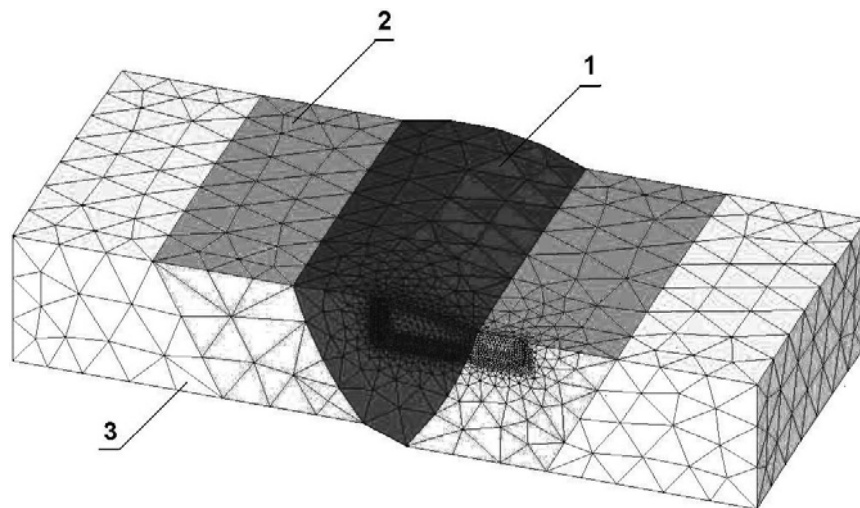


Рис. 5. Конечно-элементная подконструкция, моделирующая локальную зону сварного шва:
1 — шов; 2 — околошовная зона; 3 — основной материал

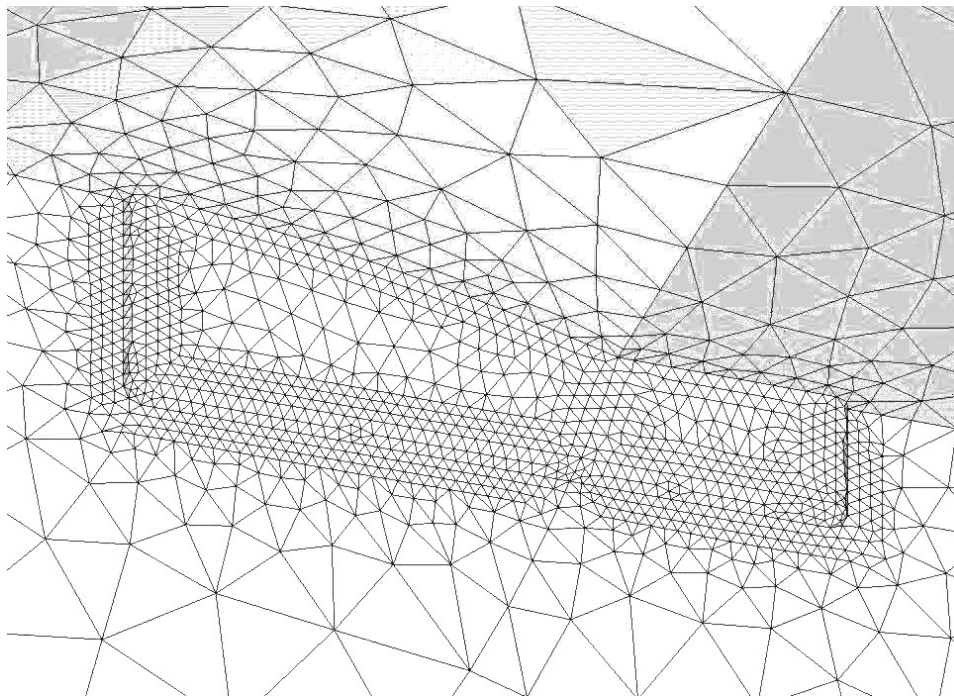


Рис. 6. Конечно-элементная аппроксимация трещинообразного дефекта, ориентированного в осевом направлении (увеличен масштаб). Длина дефекта 17 мм, ширина 4 мм, средняя глубина 4 мм

ный элемент исключался из дальнейшего расчета с помощью опции «Смерть элемента».

Поскольку процесс разрушения происходит лавинообразно и весьма чувствителен даже к малому изменению величины нагрузки, для нахождения критического давления использовался итерационный алгоритм поиска. Поиск критического давления включает два вложенных цикла. Предварительно оценивается интервал поиска критической нагрузки

$p_{\min} \leq p_{cr} \leq p_{\max}$. Далее во внутреннем цикле реализуется процесс пошагового решения при постоянном давлении, начиная с давления p_{\min} . Стратегия поиска критического давления основана на сопоставлении общего количества элементов, отбракованных к моменту окончания текущего и предыдущего шагов. Возрастающее количество «погибших» элементов свидетельствует о продолжающемся росте трещины, и внутренний цикл продолжается, пока

количество отбракованных элементов не перестанет возрастать. В этом случае следует перейти во внешний цикл, увеличить давление и повторить процедуру внутреннего цикла при новом давлении. При возникновении лавинообразного разрушения конструкции полагается, что приложенное давление больше критического и его следует уменьшить. Таким образом, во внешнем цикле итерационным образом сужается интервал поиска критического давления. Решение продолжается, пока значение критической нагрузки не будет найдено с требуемой точностью. Значения предельного давления, соответствующие предельному значению интенсивности пластических деформаций $\varepsilon_i^p = 0,01$ для исследуемого участка, в зависимости от размеров трещины приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость величины критического давления в трубопроводе от длины трещины*

Длина трещины, мм	5	10	15	20	25	30	35	40
Критическое давление, МПа	9,2	7,8	6,6	5,6	4,9	4,1	3,5	3,1

* Для трещины шириной 4 мм, глубиной 4 мм, ориентированной в осевом направлении.

Выводы

По результатам анализа можно сделать следующие выводы.

Влияние дефектов монтажа, оказывающееся незначительным на достаточном удалении от стыков, должно быть учтено при анализе НДС в зоне сварного стыка и оценке влияния на прочность трещиноподобных дефектов.

С использованием метода подконструкций, деформационного критерия разрушения и опции «Смерть элемента» численно промоделирован процесс роста трещины в районе сварного шва.

Разработанная численная методика позволяет моделировать процесс развития трещин, инициированных локальными дефектами, расположенных в зоне сварного шва, с учетом их ориентации и размеров и оценить величину критического давления для трубопровода.

Список литературы

1. СНиП 2.05.06—85. Магистральные трубопроводы / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 52 с.
2. 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.
3. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
4. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
5. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 240 с.
6. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
8. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
9. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. 256 с.
10. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел. СПб.: Профессия, 2002. 320 с.
11. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
13. Морозов Е.М., Музеймек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. 456 с.
14. ГОСТ 5264—80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
15. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
16. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
17. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
18. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

Статья поступила в редакцию 27.05.2009 г.